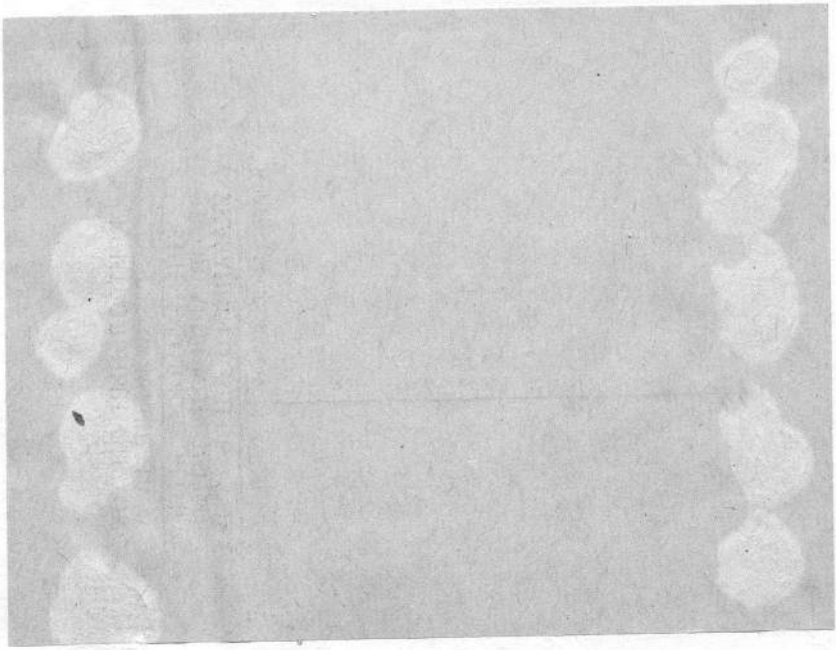
К3
Ю-66

Г. А. ЮРГЕНСОН

ТИПОМОРФИЗМ И РУДОНОСНОСТЬ ЖИЛЬНОГО КВАРЦА

С 53293



Г. А. ЮРГЕНСОН

ТИПОМОРФИЗМ И РУДОНОСНОСТЬ ЖИЛЬНОГО КВАРЦА

Областной библиотеке
им. А. С. Пушкина,
благодарный —
автор

10.12.84
г. Чита

МОСКВА
«НЕДРА»
1984

К 33,26+553,283.2
Ю 66

УДК 549.514.51:553.2

Юргенсон Г.А. Типоморфизм и рудоносность жильного кварца. — М.: Недра, 1984. — 149 с.

Изложены методы и результаты изучения состава и свойств жильного кварца. Показано типоморфное значение структур и текстур жильных агрегатов. Рассмотрены структура кварца, термолюминесценция, электропроводность, α—β-переходы, характер включений и др. Дан сравнительный анализ вариаций состава и свойств кварца из месторождений различных рудных формаций, из рудоносных и безрудных участков и жил. Выявлены типоморфные признаки кварца как критерии условий образования и оценки рудоносности кварцевых жил. Приведены примеры разбраковки рудных и безрудных жил.

Для геологов, минералогов и других специалистов, занимающихся поисками и изучением рудных месторождений.

Табл. 39, ил. 52, список лит. — 50 назв.

Рецензент — канд. геол.-минер. наук *Л.В. Чернышева* (ВИМС)

ср 532913

Читинская областная
БИБЛИОТЕКА
им. А. С. Пушкина

Чит. обл. библиотека
ФОНД
краеведения

Ю $\frac{1904020000-472}{043(01)-84}$ 56 — 84

© Издательство "Недра", 1984

ПРЕДИСЛОВИЕ

В практике геологоразведочных работ постоянно возникают трудности при оперативной оценке вероятной рудоносности открываемых рудопроявлений, флангов и глубоких горизонтов эксплуатируемых месторождений, новых жильных тел в пределах известных рудных полей и узлов, особенно в тех случаях, когда традиционно применяемые методы, основанные на непосредственном определении концентраций полезного компонента, оказываются неэффективными. Прежде всего это относится к существенно кварцевым жильным телам, в которых концентрации минералов золота, олова, вольфрама и других важнейших элементов распределены неравномерно и образуют рудные струи, крупные гнезда или столбы.

К настоящему времени во всех горнорудных районах известно множество кварцевых жил, вероятность рудоносности которых определить обычными методами достаточно трудно или невозможно без значительных затрат на горные работы или бурение скважин.

Основные задачи, которые ставил перед собой автор при написании книги, — дать анализ состояния изученности жильного кварца; описать главные методы его исследования и показать чрезвычайно широкую минералогенетическую информативность этого минерала; выявить типоморфные признаки, позволяющие относить проявления его к месторождениям определенных генетических типов или рудных формаций и оценивать рудоносность.

В книге приведен материал, полученный автором в результате изучения жильного кварца золоторудных и золото-полиметаллических месторождений Кузнецкого Ала-Тау, Забайкалья, Нижнего Приамурья, Камчатки, Северо-Востока СССР, Якутии, Узбекистана, а также Народной Республики Болгария; оловорудных месторождений Забайкалья и Приморья; месторождений вольфрама Забайкалья, Приморья, Северо-Востока СССР, а также Монгольской Народной Республики; месторождений флюорита Забайкалья, Центрального Таджикистана; пегматитов Забайкалья, Казахстана, а также Демократической Республики Афганистан.

Объекты изучения выбирались так, чтобы выявить типоморфные признаки кварца для месторождений важнейших рудноформационных и промышленных типов, различающихся также и по глубине образования.

В процессе исследований автор использовал результаты анализов проб кварца, любезно предоставленных В.Г. Дзасоховым, В.И. Красниковым, В.А. Сумотохиным, Б. М. Туниным, В.Е. Тупяковым, О.И. Широким. Большая часть аналитических данных получена в лабораториях Забайкальского комплексного научно-исследовательского института Министерства геологии СССР В.Н. Аношкиным, В.Н. Васильевой, Н.М. Дробышевой, А.А. Козаченко, Н.Г. Смирновой, Г.Т. Тумуровым, Е.В. Фоминой, В.М. Барановской и др. Всем указанным лицам автор выражает искреннюю признательность.

Автор считает своим долгом выразить благодарность профессорам А.И. Гинзбургу, Д.П. Григорьеву, А.С. Марфунину, Н.В. Петровской за ценные советы и замечания, сделанные по поводу данной работы.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение новейших методов минералогических исследований позволило решить целый ряд проблем, связанных с объяснением причин изменчивости свойств и особенностей тонкой структуры минералов. На этой основе дальнейшее развитие получило учение о типоморфизме (работы Ф.В. Чухрова, Н.В. Петровской, А.И. Гинзбурга, Д.П. Григорьева, А.Г. Жабина, Н.П. Юшкина, В.С. Балицкого, Н.З. Евзиковой, В.И. Павлишина и др.). В настоящее время доказано, что типоморфные признаки минералов можно использовать как критерии условий образования, рудноформационной принадлежности, оценки вероятной рудоносности и уровня эрозионного среза жил и месторождений. При прогнозно-оценочных работах для отнесения изучаемых объектов к определенной рудной формации необходимо выделять такие минералогические критерии, которые дают непосредственную минералогенетическую информацию. Последняя может быть получена на основе типоморфического анализа [11].

Типоморфический анализ предполагает не изучение матрицы минерала, а определение меры отклонения от нее, степени и характера дефектности. Как показывает опыт, именно вариации дефектности структуры и состава минерала, выражающиеся через изменчивость свойств, и позволяют перейти от изучения свойств и состава как таковых к использованию их в качестве критериев для создания моделей процесса минералообразования, а через моделирование — к воссозданию условий, в которых формируются руды.

Особенно интересен в этом отношении кварц, один из самых распространенных и важных минералов. Еще акад. А.Е. Ферсман указывал, что "кварц представляет замечательный типоморфный минерал, который сыграет огромную роль в поисковой и разведочной деятельности, если будет изучен систематически и углубленно". Рассматривая типоморфные минералы, он отмечал, что кварц имеет большую амплитуду колебаний свойств и чутко реагирует на изменения в природе и характере процессов.

В чистом виде кварц используется в оптике и радиотехнике, служит сырьем для синтеза пьезокварца, получения кремния, различных силицидов бора и т. д. Необходим чистый, или бездефектный, материал. Огромное количество кварца находится в кварцевых жилах. С кварцем связаны основные запасы рудного золота. Он может выступать как универсальный концентратор золота при выпадении его из гидротермальных растворов вследствие очень низкой кислотности поверхности, которая характеризует его протонодонорные свойства. Кремнезем и золото могут выделяться из растворов в результате взаимной коагуляции при определенных значениях температур, pH и концентраций [29]. Такой же процесс возможен и при эволюции растворов, содержащих кремнезем и олово или кремне-

зем и вольфрам и т. д. Способность миграции золота и нахождение его в коллоидных растворах обеспечиваются стабилизирующей ролью кремнезема, так как золь золота устойчив в кремнекислой среде за счет адсорбционного взаимодействия полимеризованных форм кремнезема с коллоидным металлом.

Ряду исследователей удалось показать, что золото и серебро входят в структуру кварца в связи с близостью размеров их ионных радиусов: Si — 0,134, Au — 0,244, Ag — 0,144 нм. Особенно важными оказались выводы о существовании зависимости между золотоносностью кварца и концентрациями в нем AlO_4-центров, полученные М.Я. Щербаковой.

Чрезвычайно широкая распространенность соединений кремния с кислородом, способных к полимеризации при наличии свободных связей, которые чаще всего возникают в присутствии OH_x-групп, определяет громадную роль кремнезема и воды в процессах рудообразования.

Обычные парагенезисы минералов золота, олова, вольфрама, многих сульфидов с кварцем не случайны и определяются особыми свойствами кремнезема, являющегося главной средой, в которой переносятся рудные компоненты и с которой вместе они кристаллизуются в кварцевых жилах или в существенно кварцевых телах.

Глава I. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КВАРЦА

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ПРЕДЕЛЫ ИЗОМОРФИЗМА

Первые сводки по примесям в кварце, соответствующие современному уровню методов исследований, были сделаны Е.В. Цинзерлинг в 1961 г., затем авторами справочника "Минералы" [31], В.А. Франк-Каменецким [48] и К. Фронделем в 1967 г. Тогда же связи состава и параметров элементарной ячейки кварца рассмотрены В.А. Франк-Каменецким и И.Е. Каменцевым. Способы вхождения примесей в кварц и связь с ними большинства технически важных его свойств освещались в работах сотрудников ВНИИСИМСа [34, 47].

Анализ накопленных к настоящему времени данных показывает, что вариации состава кварца значительно шире, чем принято думать (табл. 1). Максимальные концентрации примесей определены в жильном кварце (в основаниях кристаллов), минимальные — в горных хрусталях. Дымчатые кварцы содержат высокие концентрации алюминия, лития и натрия. Самые существенные примеси лития и железа обнаружены в аметистах. Приведенные колебания состава примесей в полной мере не могут характеризовать их вообще, ни, тем более, указывать на концентрации примесей, которые действительно входят в решетку. Относительные концентрации изоморфного алю-

Таблица 1

Содержания главных изоморфных примесей в кварце, %

Разновидность кварца	Al	Li	K	Na	Fe	Mn	Ti
Горный хрусталь	0,0008—0,1	0,0053—0,01	Не обн.—0,001	0,0001—0,0008	Не обн.—0,0019	0,00003—0,001	0,00016—0,003
Дымчатый	0,003—0,9	н. о. — 0,05	Не обн.—0,0008	0,0001—0,06	0,0015—0,03	0,00003—0,001	0,0002—0,003
Аметист	0,0—0,05	0,0—0,07	0,0001—0,0019	Не обн.—0,08	0,005—0,35	Не обн.—0,008	Не обн.—0,001
Жильный белый из оснований кристаллов	0,02—0,9	0,001—0,02	0,001—0,12	0,01—0,22	0,005—0,9	0,001—0,05	0,001—0,1
Розовый	0,005—0,042	До 0,009	До 0,003	0,001—0,009	0,0001—0,007	0,00007—0,009	0,002—0,022
Цитрин	0,002—0,014	0,0006—0,0012	0,0004—0,003	0,0002—0,006			

миния в кварце могут быть определены с помощью электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Они, как показал И.Л. Комов и ряд других исследователей [47], коррелируют с количествами, определяемыми в чистых кристаллах спектральными ими химическими методами.

Установлено, что в кварце реализуется ограниченный гетеровалентный компенсационный изоморфизм, когда кремний замещается трехвалентными алюминием, железом, марганцем, галлием, титаном, а дефицит зарядов компенсируется внедрением в междоузлия натрия, лития, водорода или редко калия. Одновременно с вхождением щелочей в каналах кварца нередко располагаются гидроксил или другие OH_x-группы. Экспериментально доказана возможность вхождения в кварц до 2,25 % германия и 0,0485 % галлия. В.С. Балицким на опытах показана и возможность вхождения в кварц фтора, вольфрама, олова, золота. Способ вхождения в структуру кварца меди и серебра изучен Р.М. Машковцевым. В виде неструктурных примесей в кварце присутствуют различные формы железа (коричневый и зеленый синтетический кварц) [5, 34].

Гетеровалентный изоморфизм в кварце реализуется по схеме [48]: $Si \leftarrow (Al^{3+}, Fe^{3+}, Ti^{3+}, Mn^{3+}, Ga^{3+}$ и др. $+ Na^{+}, Li^{+}, H^{+}, K^{+})$.

Особое значение для понимания природы кварца и условий его образования имеет исследование форм вхождения воды. Известно, что OH_x-группы находятся в кварце в координационно ненасыщенных центрах, а также структурных каналах (Me — OH-группы) и дефект-каналах, образуют силанольные (Si—OH) группы. OH_x-группы находятся также и в газово-жидких включениях. Суммарная изоморфная вместимость природного кварца не превышает 1 %.

Наиболее обогащен примесями жильный кварц. Е.И. Доломанова [46] для кварца оловорудных месторождений указывает 40 элементов-примесей, среди которых наибольшим вариациям подвержены содержания халькофильных и редких элементов. В кварце золоторудных месторождений рядом исследователей обнаружены серебро, висмут, вольфрам, свинец, медь, кобальт, никель, мышьяк, сурьма и другие элементы [49].

Жильный кварц месторождений горного хрусталя, а также из безрудных жил в метаморфических породах, как показали В.Б. Лекук и другие исследователи в 1976 г., лишен существенных количеств примесей халькофильных элементов, элементов-спутников и индикаторов оруденения.

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА

Первое полное определение менее сложной структуры β-кварца выполнено Бреггом и Гиббсом в 1925 г., затем Уайкоффом в 1926 г. В основе структуры кварца лежит гексагональная решетка с параметрами: a_0 = 0,49 нм, c_0 = 0,539 нм. На одну элементарную ячейку приходится три молекулы SiO_2. Каждый атом кремния ок-

ружен четырьмя атомами кислорода, два из которых расположены выше, а два — ниже его. Группы тетраэдров размещены по трем слоям на различных уровнях. Группы слоев образуют спирали, каждая спираль закручена в одном и том же направлении. При переходе β-кварца в α-кварц смещение атомов нарушает симметрию так, что гексагональная ось превращается в тригональную.

Структура кварца обусловливает образование структурных каналов, которые обязательны для любого кристалла. Они имеют диаметр 0,2 нм и расположены параллельно оси c; существуют также структурные каналы, перпендикулярные оси c, но с меньшим диаметром, на существование которых обратила внимание Е.В. Цинзерлинг в 1961 г.

Наряду со структурными существуют дефект-каналы. Они отличаются значительно большими размерами сечения, достигающими 25 мкм. Сечения дефект-каналов имеют различные формы [48]. Наблюдениями над искусственными и природными образцами установлено, что дефект-каналы берут свое начало от загрязнений, коллоидных частиц твердой фазы, у затравки, около включений, в дефектной области кристалла и от дислокаций.

Как показано В.А. Франк-Каменецким, Н.Н. Васильковой, С.Г. Соломкиной, Е.И. Доломановой и другими исследователями, каналы имеют важное физическое значение, являясь местом скопления примесей (вода, газообразная углекислота, углеводороды, фтор, щелочные элементы и др.). Вхождение иона в те или иные каналы обусловлено величиной его радиуса. Ионы радиуса, большего, чем 0,057 нм, не могут внедряться в кварц без искажения решетки и появления внутренних напряжений.

Многие исследователи отмечают, что существуют взаимосвязи между структурными примесями алюминия, щелочными металлами и параметром c_0. По их данным, увеличение температуры образования и скорости роста кварца влечет за собой уменьшение параметров решетки.

К. Фрондель в 1962 г. пришел к выводу, что максимальные значения параметров элементарной ячейки могут быть у наиболее высокотемпературного кварца, так как способность к изоморфному вхождению примесей в структуру α-кварца должна увеличиваться с повышением температуры кристаллизации.

Х. Кейт определил, что следует различать влияние изоморфных (входящих в тетраэдр — *Г.Ю.*) и интерстициальных (в структурных каналах — *Г.Ю.*) примесей на размеры элементарной ячейки: различные изоморфные примеси (Al, Fe, Ti и др.) увеличивают параметр c_0, а интерстициальные (Na, Li, Ca и др.) — a_0.

Н.Ф. Картенко, Г.А. Сидоренко, С.Г. Соломкина и др. [36] дают следующие пределы изменений размеров элементарной ячейки: a_0 — от 0,49120 до 0,49156 нм, Δa = 0,00036 нм; c_0 — от 0,54038 до 0,54081 нм, Δc = 0,00043 нм; V_0 — от 0,112924 до 0,113134 нм^3, ΔV = 0,00021 нм^3; c_0/a_0 — от 1,0096 до 1,10038.

В.С. Балицкий и другие исследователи [47] получили максимальное значение объема элементарной ячейки, равное 0,113210 нм^3, что увеличивает ΔV до 0,000286 нм^3. Изменчивость параметров элементарной ячейки синтетического кварца с содержанием примесей (до 2 %) достаточно велика: вариации содержания германия от 0,0433 до 2,25 % вызывают изменчивость a_0 от 0,49132 до 0,49157 нм, а c_0 — от 0,54046 до 0,54076 нм. Примеси галлия от 0,0012 до 0,0485 % приводят также к существенным изменениям размеров: a_0 — от 0,49129 до 0,49134 нм и c_0 — от 0,54042 до 0,54051 нм. Увеличение общего количества структурных примесей ведет к увеличению параметров элементарной ячейки кварца. При сравнении мориона и прозрачного кварца из одного и того же пегматитового месторождения получено соответственно: a_0 = 0,49130 и 0,49119 нм, c_0 = 0,54065 и 0,54040 нм. По данным Ю.П. Сорокина, уменьшаются параметры элементарной ячейки кристаллов аметиста Ватихи (Урал) по сравнению с их кварцевым субстратом: горный хрусталь, являющийся "ножкой" (субстратом) аметиста, имеет: a_0 = 0,49141 и c_0 = 0,54049 нм, а аметист — a_0 от 0,49120 до 0,49126 и c_0 от 0,54038 до 0,54045 нм при V_0 от 0,112927 до 0,112956 нм^3.

При изучении влияния условий образования и примесей на параметры элементарной ячейки кварца обнаружено, что разные образцы зернистых агрегатов его отличаются не только размерами элементарной ячейки, но и совершенством строения, что находит отражение в характере рентгенограмм [36]. Степень расширения дифракционных отражений от $23\bar{5}4$ для различных образцов относительно эталонного кварца месторождения Кожим неодинакова. Расширение линий связывается с существованием областей небольших размеров, обусловливающих когерентное рассеяние рентгеновских лучей, и наличием напряжений второго рода.

Систематическое изучение отмеченной особенности рентгенограмм кварца по специально разработанной методике на материале, отобранном из различных генераций кварца ряда золоторудных месторождений, относящихся к разным рудным формациям, показало большую минералогенетическую информативность количественного определения степени расширения дифракционных линий от $23\bar{5}4$. Количественное выражение этого расширения предложено считать показателем степени совершенствования кристаллического строения (СКС) индивидов и зернистых агрегатов кварца [50].

ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НА УРОВНЕ АТОМНОГО СТРОЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКИ

Изучение природы примесей, окраски и термолюминесценции минералов, в том числе и кварца, с применением ЭПР показало, что появление их может быть обусловлено дефектами атомной структуры кристаллической решетки. Среди них важнейшими являются точечные дефекты, к которым относятся: "1) вакансии анионов и молекул; 2) "межузельные" (интерстициальные) положения

атомов и молекул; 3) примесные ионы (изоморфные и интерстициальные) и примесные радикалы; 4) атомы при неупорядоченном распределении; 5) агрегаты вакансий и примесей" [30, с. 221]. Последний тип дефектов уже характеризует дефектность не отдельной элементарной ячейки, а целые группы дефектов, их скопления, называемые кластерами.

Более крупные ансамбли дефектов дают коллоидальные выделения, а скопления вакансий могут перейти в поры больших размеров. В кварце коллоидальные выделения Al^{3+}, Na^{+}, K^{+}, Li^{+} в ассоциации с ОН-группами образуют неоднородности размером порядка 20—30 нм. По данным Л.И. Цинобера и В.Е. Хаджи [47], эти неструктурные примеси входят в искусственный кварц, кристаллизовавшийся из концентрированного раствора в щелочной среде. К подобного рода дефектам относят неструктурную коллоидально-дисперсную примесь Al, Fe и других компонентов, захватывающихся при высоких скоростях роста из пересыщенных растворов. Эти примеси являются предцентрами дымчатой окраски, возникающей при термообработке. Примером крупных скоплений вакансий могут быть дефект-каналы в кварце. В кварце нередки двойные дефекты — пары дефектов.

Современная степень изученности точечных дефектов и обусловленных ими центров позволила А.С. Марфунину для кварца выделить две их группы — примесные и с вакансиями. Классификация их сведена [5, 6, 15, 30, 34, 42, 46, 47 и др.) в табл. 2, из которой вытекает, что дырочные центры образуются при замещении кремния алюминием, железом и другими катионами, отличающимися от него по валентности, а также и при вакансиях кремния.

Электронные центры возникают при замещении кремния катионами одинаковой с ним валентности, но образование их связано с различиями в зарядах ядер и строении электронного окружения. Кроме того, они возникают в результате захвата электрона при вакансиях кислорода.

В качестве компенсаторов зарядов во всех случаях в междоузлия (каналы) внедряются протон, ионы лития, натрия, иногда и некоторые щелочноземельные элементы — магний и кальций. Компенсация зарядов, связанная с вакансиями кислорода, может быть реализована гидроокислом или фтором. Вероятность вхождения их в структуру кварца вполне определенно показана исследованием ИК-спектров [3].

Примесные центры возникают в кварце в связи с известным гетеровалентным изоморфизмом при замещении Si^{4+} на Al^{3+} с недостатком заряда [30, 47]. Аналогичные дефициты положительных зарядов возникают и при замещении кремния трехвалентным железом, галлием, титаном, германием. При этом образуется ловушка положительной дырки. Реализация электронейтральности (захват дырки) в таких случаях, как полагают, "несимметрична" относительно распределения электронов, так как сама вакансия катиона остается пустой, а электроны перераспределяются на электронных оболоч-

Таблица 2

Классификация точечных дефектов

Группы центров	Обусловленные примесями		Обусловленные вакансиями	
	Замещающий катион	Тип центра и компенсаторы	Вакантный анион	Тип центра
Электронные ($M^+ + e^-$)	Ti^{3+}	$Ti^{3+} - Li^+$ $Ti^{3+} - H^+$	Кислород	E_1 — электрон, захваченный кислородной вакансией.
	Ge^{3+}	$Ge^{3+} - Li^+$ $Ge^{3+} - H^+$ $Ge^{3+} - Na^+, Li^+$ $Ge^{3+} - H^+, Na^+, Li^+$ $Ge^{3+} - Na^+$		E_2 — электрон, захваченный на несвязывающей гибридизированной орбите кремния, расположенного вблизи дивакансии Si – O; на месте вакансии кремния располагается протон, а в междоузлии щелочноземельный компенсатор
	Mn^{3+} и другие $M^{4+} + e^-$			
Дырочные (M^{3+}, M^{2+}, H^+, Na^+, Li^+)	Al^{3+}	$O^- - Al^{3+}(AlO_4^{4-}) / H^+$ $O^- - Al^{3+} / Li^+$ $O^- - Al^{3+} / Na^+$ $O^- - Al^{3+}$ — усиливающий центр с вакансией кислорода и кремния $O^- - Al^{3+} / Na^+ + Li^+$ $O^- - Al^{3+} / Li^+ + H^+$	Кремний	E_3 — дефект типа O^- с дивакансией Si – O; смещенный кислород $E_ц$ — дефект типа O^- вблизи дефектного тетраэдра с вакансией кремния
	Ga^{3+}	$O^- - Ga^{3+}(GaO_4^{4-}) / H^+$		
	Mg^{2+}	$O^- - 2Mg^{2+} / H^+, Li^+, Na^+$ $O_2^{3-} - M^+$		

ках анионов, окружающих вакансию. Так, при удалении лишнего электрона облучением его недостаток (дырка) локализуется не на катионе Al^{3+}, а преимущественно на ближайшем анионе кислорода. Поэтому O^{2-} ($2p^6$) переходит в O^- ($2p^5$). Следовательно, при гетеровалентном изоморфизме в кварце примеси трехвалентных Al, Fe, Ti, Ga и т. д. приводят к образованию дырочного центра не на самом дефекте, а на ближайшем к нему ионе кислорода. По схеме А.С. Марфунина [30] это можно представить так: M^{4+} решетки + $O^{2-} \xrightarrow{\text{замещение примеси}} M^{3+} + O^{2-} \xrightarrow[\text{облучение}]{h\nu} M^{3+} + O^{2-} + e^+ \xrightarrow{\text{захват дырки}} M^{3+} + O^-$.

Для того чтобы сформировался дефект, примесный ион не обязательно должен отличаться от замещенного валентностью. Области с положительными или отрицательными зарядами, способные захватывать дырку или электрон, могут возникать и в результате разли-

чий в заряде ядра, а также их электронного строения и конфигурации молекулярных орбиталей, способе заселенности электронного окружения и т. д. Примерами возникновения точечных центров, связанных с такими дефектами, могут быть замещения кремния титаном или германием (см. табл. 2).

В 1973 г. М.И. Самойлович, А.И. Новожилов и другие исследователи описали спектр ЭПР дырочного центра O^- в слабодымчатом природном кварце, связанный с замещением кремния на Mg^{2+}. Угол 2θ Si — O — Si, в котором один из атомов кремния замещен на Mg^{2+}, получился равным 130 °, что свидетельствует о сильном искажении тетраэдра.

В последнее время М.Я. Щербакова с сотрудниками установила ряд новых парамагнитных центров, которые согласуются с моделью центра, связанного с захватом двух дырок на эквивалентную пару ионов кислорода алюмокислородного тетраэдра.

Кроме этих центров выявлены парамагнитные центры, обусловленные примесями меди, располагающейся в тетраэдрических пустотах вблизи ионов кислорода.

Центры с вакансиями кремния (O_2^{3-}) возникают при захвате дырки двумя ионами кислорода на двух из четырех 0—0 ребер в кримнекислородном тетраэдре. На двух разных ребрах возникают две разновидности центра [30]. Они имеют по три положения каждая. На ЭПР-спектре наблюдается СТС (сверхтонкая структура) от взаимодействия с ядрами кремния-29 соседних кремнекислородных тетраэдров и с протонами в каналах, т. е. для компенсации зарядов все же в решетку кварца входят ионы H^+, но не на место вакансий, а в междоузлия.

В природных морионах наблюдались также еще два (E_3 и E_4) центра дырочного типа [34]. Центр E_3, по предположению М.И. Самойловича и ряда других исследователей [47], связан с дефектом типа O_i^-, который локализован в тетраэдре с дивакансией Si—O. По сути дела, он представляет собой смещенный или межузельный кислород. Центр $E_ц$ представляет собой дефект типа O^-, который локализован вблизи дефектного тетраэдра, т. е. с вакансией кремния. Этот центр обусловлен присутствием кислорода, который не связывает атом кремния.

Центры с вакансиями кремния могут быть, вероятно, подвижными. Это вытекает из представлений Н.В. Белова о подвижном характере не целых кремнекислородных тетраэдров, а только SiO_2 группы.

Центры с вакансиями кислорода (V_0) в радикале SiO_4^{4-}, имеющие электронную природу, были описаны Виксом в 1963 — 1964 гг. [47]. В этом случае захватывается электрон, распределяющийся по всему радикалу, и возникает электронный центр типа SiO_3^{3-} или SiO_3V_0. В структуре кварца одна группа ионов кислорода образует связи Si—O длиной 0,1617 нм с углом 44° к оси L_3 и принадлежит к короткому кислородному ребру тетраэдра (0 — 0 = 0,2614 нм);

у другой группы ионов Si—O равно 0,1597 нм под углом 66 ° к L_3, и принадлежит она к 0—0 ребру длиной 0,2640 нм. Поэтому могут образоваться две разновидности центров с вакансиями кислорода, соответствующие типу вакантного кислорода. Они обозначаются соответственно: 1) $[Si(E_1)e^-]$ и 2) $[^-Si(E_2)e^-]$.

Их наблюдали при изучении ЭПР природного кварца, облученного гамма-излучением или нейтронами. В нем происходит захват вакансий кислорода в тетраэдре с германием вместо кремния с образованием $[Ge(E_1)e^-]$- и $[Ge(E_2)e^-]$-центров, т. е. GeO_3^{3-}. Известны также разновидности этих центров в зависимости от ионов-компенсаторов: протона (H^+), лития или натрия в структурных каналах и от их положения. В природных образцах они встречались редко.

Радиационные центры [30, 34, 47] возникают в дефектном кварце в результате воздействия естественной радиоактивности, облучения рентгеновскими либо γ-лучами, нейтронами и др. Такие центры образуются в связи с дефектами, обусловленными замещением кремния на какой-либо катион или вакансиями кремния или кислорода.

Механизм возникновения радиационных центров в случае кремний-алюминиевого изоморфизма следующий: один из ионов кислорода тетраэдра AlO_4^- в структуре кварца при облучении может терять электрон и переходить в парамагнитное состояние O^-. В принципе кварц можно облучить такой дозой, что все имеющиеся примесные дефекты станут дырочными радиационными центрами O^-. Если измерить интегральную интенсивность спектра ЭПР такого образца, то можно определить и количество Al, замещающего кремний.

Другая группа радиационных центров — E-центры. Они образуются в результате захвата электрона кремнием в кремнекислородном тетраэдре вблизи структурного дефекта либо элемента-примеси.

Наиболее распространенным наряду с O^-—(Al)-центром примесного типа является *E*-центр, связанный с наличием неспаренного электрона на разорванной вследствие образования вакансий кислорода или кремния связи Si—O. По данным Б.И. Моисеева и Л.Т. Ракова, E-центры в природных условиях создаются под действием α-частиц, а O^-—(Al) -, или Al-центры, по терминологии этих исследователей, рождаются исключительно γ-квантами. Этот вывод позволяет использовать кварц в палеодозиметрии как селективный дозиметр α- и γ-фона.

Л.Б. Бершов, А.С. Марфунин и А.В. Сперанский [6] установили стабильный радиационный дырочный центр в кварце, структурная модель которого (O_2^{3-} — M^+) реализуется в кварце в виде дырочного центра, локализованного на большом кислородном ребре 0(1) — 0(4) дефектного кремнекислородного тетраэдра "... с вакансией кремния, а, возможно, и с вакансией двух ионов кислорода, т.е. от AlO_4-тетраэдра остается одно ребро O_2^{3-}" (с. 115). Условием возникновения центра является, как полагают авторы, наличие одновалентного иона-компенсатора M^+ в структурном канале. В зависимости от типа ионов-компенсаторов различают две разновидности

центров и ЭПР-спектров: I — с компенсатором H^+; II — с литием, натрием или H^+ в другой позиции. Описанный центр наблюдался в жильном кварце рудных месторождений, а также в бесцветных кристаллах, которые после γ-облучения приобретали морионоподобную окраску.

В последнее время стали появляться работы, в которых приводятся сведения о наличии целого комплекса точечных дефектов различной природы в одном кристалле. В ряде кристаллов, в частности розового кварца из Бразилии и с Мадагаскара, которые содержат 0,01 % Ti, Дж. Исайя и Дж. А. Вейл (J. Isoya, J. A. Weil) в 1979 г. описали комплекс центров $[TiO_4^-]$ — за счет замещения кремния трехвалентным титаном, два типа нескомпенсированных германиевых центров: Ge^{3+} $[GeO_4^-(I)]^-$ и $[GeO_4^-(II)]^-$ и дырочные алюминиевые центры с компенсацией заряда литием: $Li[AlO_4^0/Li^+]^+$. Была показана возможность диффузии лития, которая превращает $[TiO_4^-]^-$ в центр $[TiO_4^-(A)/Li^+]^0$, а также водорода с образованием $[TiO_4^-(A^3)H^+]^0$- и $[TiO_4^-(B)H^+]^0$-центров. Атомарный водород был зарегистрирован по спектрам ЭПР.

Р.И. Машковцев в 1978 г. показал, что *E*-центры даже в одном образце могут иметь многоваканcионную природу, что обусловливается достаточно высокой подвижностью вакансий в решетке кварца во время облучения и способностью их к комплексообразованию.

Следует отметить, что поскольку любой центр связан с наличием электрона, то при его описании, конечно, необходимо учитывать не только взаимодействие атомов, но и электронные взаимодействия. По сути дела, приведенные выше центры — лишь наиболее удобные к настоящему времени их модели, отвечающие уровню их исследованности.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФОРМ КРИСТАЛЛОВ И АГРЕГАТОВ

Изменчивость форм и скульптуры кристаллов. Г. Кальб, В. Маухер, Г.В. Вировлянский, А.В. Шубников, Г.Г. Леммлейн, С. Мюге разработали схемы, в основе которых лежит идея о том, что по мере понижения температур растворов и концентраций кремнезема до определенного предела увеличивается роль граней призмы, и вместо дипирамидальных и призматически-дипирамидальных индивидов в эффузивах и короткостолбчатых кристаллов начала пегматитового процесса в гидротермально-пневматолитовую и гидротермальную стадии возникают тригональнопризматические кристаллы, а затем обелисковидного и гидротермального типа Дофинэ (с гипертрофированной одной гранью ромбоэдра). Из низкотемпературных растворов вновь выделяются короткостолбчатые кристаллы с очень короткими гранями призмы и сильноразвитыми обоими ромбоэдрами, имеющими псевдодипирамидальный облик [31].

Общая схема изменения типоморфных черт кварца в пегматитовом процессе дана А.Е. Ферсманом. Он показал, что вначале выде-

ляется светло-серый или прозрачный β-кварц, кристаллы которого лишены грани призмы. Затем в пустотах появляются короткопризматические толстостолбчатые кристаллы, концы головок которых из серых становятся дымчатыми или черными. Этот кварц довольно часто сменяется молочным, образующим футляры вокруг раухтопаза. За молочным кварцем, по А.Е. Ферсману, следует горный хрусталь удлиненного типа (Дофинэ) и шестоватый мутный (III тип Маухера из альпийских жил). Завершают процесс мелкокристаллические агрегаты, иногда аметисты и халцедоны, трещинки в которых выполнены короткостолбчатыми псевдодипирамидальными новообразованиями. В схеме А.Е. Ферсмана нашли отражение закономерности Кальба и Маухера, выведенные для альпийских жил. Он показал, таким образом, общие тенденции в изменчивости форм, агрегатов и окраски последовательно образующихся индивидов кварца.

В настоящее время эта схема нашла обоснование в результате многочисленных экспериментов по выращиванию кристаллов кварца [5, 28, 34 и др.]. Выявлено, что в сильнощелочных растворах при относительно высоких пересыщениях скорость роста граней r и R линейно зависит от концентраций: по мере уменьшения пересыщения кремнеземом скорости их роста сближаются. Поэтому в среднетемпературных гидротермальных жилах смена длиннопризматических и обелисковидных кристаллов к концу процесса изометричными и скипетровидными вполне может быть объяснена уменьшением концентраций кремнезема в растворе. Кроме того, по В.С. Балицкому [46], короткопризматические кристаллы кварца могут возникать в условиях высоких температур (400—500 °С) в пегматитовых телах в закрытых системах из растворов с невысоким пересыщением кремнеземом. При изменении тектонического режима или щелочности гидротерм могут появляться условия для растворения ранее образованных кристаллов и кварцевых ядер. Это приводит к пересыщению растворов и появлению поздних, нередко зональных обелисковидных или длиннопризматических кристаллов со следами многократных растворений и регенераций.

Эксперименты [5, 46 и др.] показали, что при скорости роста граней основных ромбоэдров более 0,0001 мм/сут форма головок кристаллов, которые растут в положении, отклоненном от нормали к земной поверхности в данной точке, искажается. При меньшей скорости роста искажений нет. Они могут быть связаны также и с повышением концентраций кремнезема. Если скорости роста $(01\bar{1}1)$ и $(10\bar{1}1)$ близки между собой или стремятся к нулю и пересыщения кремнеземом очень низки, то искажений вершин не наблюдается независимо от положения растущего кристалла в пространстве.

В общем случае кристаллы кварца, растущие вертикально, должны иметь форму призм в комбинации с ромбовидными (внешняя симметрия $L_3\,3P - 3m$ или $L_6\,6P - 6mm$). Если же они растут наклонно, то нередко имеют внешнюю симметрию, близкую к моноклинной $(P - m)$. Эта закономерность связана с тем, что симметрия поля земного тяготения, отвечающая симметрии конуса $[L_\infty \infty P\,(\infty m)]$,

ор 532913

Читинская областная БИБЛИОТЕКА им. А. С. Пушкина

воздействует, согласно принципу Кюри, на формирующиеся в нем тела, и они также должны иметь тот же мотив внешней симметрии. Поэтому, по И.И. Шафрановскому, вертикально растущие кристаллы имеют часто искаженную форму *n*- или ди-*n*-гональных "пирамид" (обелисковидные и остроромбические кристаллы), а наклонно и горизонтально растущие кристаллы имеют моноклинно-диэдрические формы (тип Дофинэ).

Проблема *вициналей* долгое время считалось одной из важных для понимания кристаллогенеза. Исследования В.С. Балицкого, В.В. Буканова, Д.П. Григорьева и А.Г. Жабина показали, что отчетливо выделяются два типа вициналей: у вициналей первого типа угол между нижними ребрами вициналъных треугольных пирамид около 90°, а второго типа — около 160°; тип вициналей не является критерием отнесения кристалла только к низко- или высокотемпературному образованию; смена одного вицинального типа другим может отражать изменение условий кристаллизации и наблюдается на разноименных гранях основных ромбоэдров из-за различия в скоростях роста. Экспериментально выяснено, что "...изменение концентраций и температуры кристаллизации (от 100 до 340 °С), а также добавки различных элементов-примесей (Na, Li, K, Sn, P, B, Pb, Ge, Ga и др.) не привели к изменению формы..." [46, с. 134] трехгранных пирамид второго типа по Г. Кальбу, на гранях *R* и бугров роста и переходных от них форм к пирамидам первого типа на гранях *r*.

К настоящему времени сложилось представление о том, что появление вициналей определенных типов зависит лишь от изменения кислотности — щелочности растворов и их состава. Полагают, что вицинали в виде бугров роста указывают на более щелочной характер растворов. По данным В.В. Буканова [7], формы вициналей являются лишь ростовыми фрагментами граней, по тем или иным причинам прекративших свое формирование.

Все это свидетельствует о том, что вицинали не имеют самостоятельного минералогенетического значения и могут использоваться как вспомогательные данные при комплексном изучении кристаллов.

Изменчивость форм зернистых агрегатов. Решение задачи об изменчивости морфологии зерен и агрегатов для восстановления процессов образования жильного кварца, представляющего собой агрегаты индивидов различной идиоморфности, возможно с позиций учения об онтогении и филогении, разработанного Д.П. Григорьевым [12] и его последователями. На практике геолог чаще всего имеет дело с зернистыми агрегатами, их структурой и текстурой. Проблема генезиса агрегатов представляется поэтому одной из важнейших для понимания процессов формирования жильного кварца.

Из множества известных вариаций структур агрегатов жильного кварца выделяют две генетические группы: агрегаты роста и перекристаллизации без существенного влияния деформаций и агрегаты деформационных преобразований.

Среди агрегатов жильного кварца первой группы можно выделить структуры и текстуры, возникающие и изменяющиеся за счет внут-

ренней энергии системы [17]:а) первичной кристаллизации (отложение) и роста (сингенез); б) автометаморфических преобразований (диагенез). В случае быстрого затвердевания в условиях малых глубин происходят раскристаллизация и перекристаллизация твердофазных неупорядоченных агрегатов, образовавшихся в результате затвердевания и кристаллизации густых флюидов.

Среди жильных поликристаллических сростков кварца по регулярности сложения выделяются три группы:

а) субизометричнозернистые, характеризующиеся относительно изотропным выполнением трехмерного пространства; к ним относятся равномерно- и неравномернозернистые массивные агрегаты, а также агрегаты гранулированного и роговикового жильного кварца;

б) призматически-зернистые, характеризующиеся анизотропным выполнением трехмерного пространства, в которых в направлении удлинения индивидов располагается короткая ось агрегата; агрегаты имеют форму пластин с плоскими или криволинейными граничными поверхностями; к подобным агрегатам относятся параллельношестоватые, гребенчатые, кокардовые, корковые агрегаты жильного кварца. Частным случаем призматически-зернистых агрегатов с резким преобладанием индивидов, длинная ось которых совпадает с направлением их роста, — с криволинейной субсферической граничной поверхностью агрегата по фронту отложения вещества, — являются радиально-лучистые агрегаты центробежного (конкреционного) роста;

в) комбинации первых двух групп агрегатов на разных подуровнях агрегатного уровня организации минерального вещества дают все многообразие минеральных зернистых агрегатов.

Типичные примеры структур и текстур быстрого затвердевания и кристаллизации с последующей перекристаллизацией упорядочения описаны на многих золоторудных месторождениях малоглубинной золото-серебряной формации, но наиболее полно это было сделано на примере Балейского рудного поля Н.В. Петровской и др. [10].

Полосчатые существенно кварцевые агрегаты, рассматриваемые как продукты раскристаллизации гелей, из золоторудных месторождений Узбекистана описаны М.И. Моисеевой, Р.П. Бадаловой, А.М. Жирновым и др. В 1976 г. М.Д. Увадьев для этого же региона описал типоморфизм и условия образования кварцевых фестончатых, волнистых, сферолитовых, слоистых и брекчиевидных агрегатов. Подобные существенно кварцевые жильные образования из месторождений Северо-Востока СССР изучены В.И. Найбородиным и А.А. Сидоровым.

Касситерит-кварцевые массивно-полосчатые, кокардовые, фестончатые, сферолитовые агрегаты описаны О.Д. Левицким [37], Л.М. Лебедевым [27] и др.; полосчатые кварц-молибденитовые агрегаты Шахтаминского месторождения исследованы В.И. Сотниковым. Изменчивость строения существенно кварцевых агрегатов по вертикали в последовательности их образования детально рассмотрена В.С. Кормилициным и А.А. Ивановой на примере Широкинского золото-полиметаллического месторождения.

Чит. Обл. библиотека
Фонд
краеведения

Структуры жильного кварца золоторудных жил среднеглубинных месторождений, возникающих в условиях относительно медленных изменений температур и давлений, рассматривались Г.П. Барсановым, Н.В. Петровской [40] и др. В этих работах особое внимание обращено на внутрирудный метаморфизм, процессы грануляции, перераспределение золота в массе кварцевых агрегатов. Дальнейший анализ структур жильного кварца, процессов его деформаций, в том числе пластических, перекристаллизации и переотложения, очищения, формирования хрусталеносных гнезд выполнен группой уральских исследователей под руководством Г.Н. Вертушкова [18—20]. Структуры агрегатов кварца кристаллических горных пород описаны М.Я. Кацем и И.М. Симановичем в 1974 г. с использованием обобщений Н.В. Петровской, Г.Н. Вертушкова и др. Из обобщений следует, что практически во всех жилах и горных породах первичные структуры кварцевых агрегатов в той или иной мере утрачены в результате поздних метаморфических процессов. Тем не менее, по данным Г.Н. Вертушкова и других исследователей среди кварцевых жил в пределах Уфалейского и Сысертского мигматитовых комплексов, в экзоконтакте Джабык-Карагайского гранитного массива и на других месторождениях жильного кварца наблюдались относительно молодые жилы, в которых сохранены первичные текстуры и структуры агрегатов.

Теперь очевидно, что жильный кварц претерпевает существенные преобразования, связанные с перерождением в процессе упорядочивания и метаморфизма.

Одним из важнейших процессов преобразования кварца является его перекристаллизация, происходящая при изменении температур, давлений и концентраций. В случае метастабильных агрегатов, возникших из коллоидных растворов, она начинается самопроизвольно, сопровождаясь уплотнением гелей кремнезема, дегидратацией и упорядочиванием [27]. При этом большое значение имеет собирательная перекристаллизация, которая обусловлена, по Д.С. Коржинскому, большей способностью к растворению мелких зерен за счет более высокого давления, обусловленного большей энергией поверхностного натяжения в мелкозернистых агрегатах по сравнению с крупнозернистыми. Перекристаллизация с перемещением вещества связана с диффузией воды и растворенных в ней веществ вдоль границ зерен. Энергия активации ионов в краевых частях зерен в агрегате, по оценке А.Г. Жабина [17], в 2 раза ниже, чем внутри зерен. Интенсивность перекристаллизации зависит от примесей.

В результате исследований В.Г. Дмитриевского, Н.В. Петровской, Р.Л. Фолка, Х. Блатта и Дж. Кристи, Н.Л. Картера, Г.Н. Вертушкова достаточно полно разработаны методика изучения и теория возникновения деформационных структур жильного кварца. Вопросы образования и распределения деформационных структур породообразующего кварца, включая и жильный, рассмотрены также М.Я. Кацем и И.М. Симановичем.

Установлено, что вследствие пластических деформаций скольже-

ния, когда отдельные, составляющие зерно части (блоки) уже разориентированы на несколько градусов, возникает блочность, проявляющаяся в блочном угасании кварца. Блочность бывает неправильной, линейной и брусковидной.

Неправильная блочность может быть обусловлена как дефектами роста (кристаллизационная), так и динамометаморфизмом. Размеры блоков различны, контуры — полигональные, извилистые.

Линейная блочность характеризуется появлением серий взаимосубпараллельных блоков, располагающихся как в пределах одного зерна, так и могущих переходить из одного в другое. Угасание при вращении столика микроскопа фронтально перемещается из блока в блок.

Брусковидная блочность отличается тем, что границы блоков образуются пересечением двух пар субпараллельных серий зон дислокаций под углами, близкими к прямым. Блоки имеют субпараллельноэдрическую форму. Угасание в них чередуется в шахматном порядке.

Дальнейшее углубление деформаций приводит к появлению мозаичности, которая в шлифах выражается в мозаичном угасании. По Н.В. Петровской, при возникновении мозаичности деформации "...сосредотачиваются в узких межблоковых зонах при мало искаженных или совершенно неискаженных самих блоках. Крупное зерно кварца не получает "изгиб", а как бы "разламывается" на части" [40, с. 17]. Поэтому она называет такое перерождение жильного кварца и возникающие при этом структуры структурами мозаичного "распадения" зерен. Четкость границ мозаики и степень различия в оптической ориентировке мозаичных блоков варьируют в зависимости от близости к зонам тектонической активности: вдали от них разориентировка отдельных блоков мозаики составляет 1—3°, а вблизи — 10—20°.

Процессы преобразования агрегатов жильного кварца следует учитывать при оценке его рудоносности. В частности, Н.В. Петровская показала, что в наиболее благоприятной обстановке для формирования наложенного золота оказываются кварцевые жилы с широко развитыми деформациями изгиба, которые можно наблюдать по характеру волнистого погасания. В крупных зернах деформации изгиба проявляются по асимметричному угасанию и искривленноблочному сложению. К этим участкам чаще всего приурочены скопления золотин. Кварц со структурой мозаичного распадания и мозаичной грануляционной структурой не содержит высоких концентраций золота и сульфидов. Процесс грануляции способствует скорее выносу металла. Однако в микротрещинах выщелачивания, которые часто совпадают с границами мозаичных блоков, Н.В. Петровская наблюдала также и переотложенное золото в виде несовершенно развитых кристалликов.

Все сказанное свидетельствует о том, что продукты деформации индивидов кварца неустойчивы и становятся исходным материалом для дальнейшей перекристаллизации и перераспределения рудного

вещества. Следовательно, изучение структур и текстур агрегатов жильного кварца имеет минералогенетическое значение, а ряд их особенностей, как будет показано ниже, может быть использован в качестве типоморфных признаков и критериев оценки условий образования и рудоносности.

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРИРОДА ОКРАСКИ

Светопреломление. Показатели преломления кварца достаточно стабильны и различаются только после четвертого знака за запятой. У различно окрашенных кристаллов светопреломление может изменяться в пределах ±0,0004. При этом у дымчатых разностей оно уменьшается по сравнению с бесцветными. У аметиста светопреломление значительно выше. В связи с тем, что измерения светопреломления с точностью, превышающей 0,0001, трудоемки и требуют специальных условий, они не могут быть выполнены в массовом количестве в условиях рядовых лабораторий и в настоящее время не рекомендуются для выявления типоморфных признаков.

Оптическое поглощение в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Кварц (его бесцветные разновидности) пропускает свет в видимой и ультрафиолетовой областях спектра лучше, чем другие вещества. Существенное поглощение заметно только в коротковолновой ультрафиолетовой области при длине волны 175 нм. Центры дымчатой окраски дают две дихроичные полосы в видимой области (450 и 620 нм), которые соответствуют разрешенному и запрещенному переходу между электронными уровнями этих центров [34]. Радиационные цитрины имеют полосы поглощения в областях 390—410 и 620 нм. Морионы, как и дымчатые кварцы, имеют две полосы поглощения в областях 450 и 620 нм. Но в отличие от дымчатых у них наблюдается сильное поглощение в области 200—300 нм. Аметисты дают полосы поглощения в областях 280, 350, 540 и 940 нм. В синей и красной областях спектра четко выражен дихроизм [34].

ИК-спектры. В ИК-области кварц имеет полосы поглощения, связанные с колебаниями как O—Si—O-связей в кремнекислородных тетраэдрах, так и связей в различных формах воды и связанных с нею щелочных металлов.

В ИК-спектре поглощения кварца выделяются три основные области поглощения: ν_1 (700—800 $см^{-1}$) и ν_3 (1100 $см^{-1}$) относятся к валентным, а ν_4, представленная дублетом (465 и 515 $см^{-1}$), отвечает деформационным колебаниям. Полоса ν_3 связана с "растягивающими" колебаниями типа ← SiO—Si → ; вторая — тоже с растягивающими колебаниями, но связей ← Si—O—Si →; третья полоса обусловлена деформационными колебаниями Si—O—Si и O—Si—O. Эти теоретические значения частот в реальных кристаллах имеют значительные пределы вариаций. Как показывает опыт [43], на ИК-спектрах, снятых с пластинок кварца, всегда появляется также дублет в областях 2220—2270 и 2120—2185 $см^{-1}$, который, по сло-

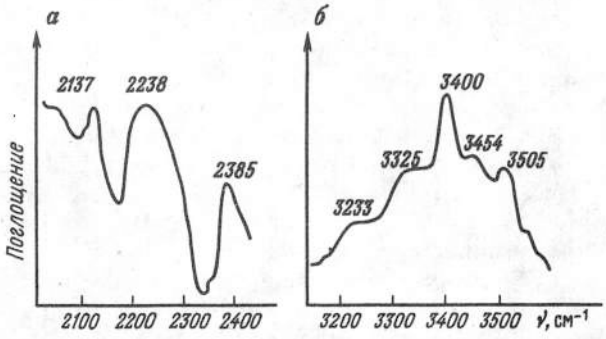


Рис. 1. ИК-спектры α-кварца.
а — обертоны собственных колебаний решетки; б — примеси OH_x-групп

Таблица 3

Характеристика полос поглощения на ИК-спектрах кварца в области 3000—3800 $см^{-1}$

T-293 К	*T*-80 К	Тип дефекта	*T*-293 К	*T*-80 К	Тип дефекта
3200		H_2O	3450		OH–(Al–Na)
	3311	OH–(Al–H)		3453 }	OH–(Al–Na)
3318	3318	OH–Al		3457 }	
3320	3320	H_2O		3470	OH–(Al–H)
	3371	OH–(Al–H)		3485	OH–(Al–Li)
3383	3383	OH–(Al–Na)		3487	OH–(Al–Li)
3385 }		OH–(Al–Li)	3490—3500		H_2O
3390 }	3396	OH–(Al–Li)	3520		OH–(Al–Li)
3400		H_2O		3534	OH–(Al–Na)
3432		OH–Al		3538	OH–(Al–K)
	3440	OH–(Al–Li)		3550	OH–(Al–K)
				3556	OH–(Al–Na)
			3580	3572	Связан с присутствием F

Примечание. Компенсация зарядов вхождением в решетку калия встречается относительно редко.

жившимся представлениям, связан с обертонами собственных колебаний решетки кварца (рис. 1, *а*).

В области 3200—3600 $см^{-1}$ на ИК-спектрах кварца имеется серия

полос поглощения, которые информативны в отношении примесей различных форм OH_x-группировок (рис. 1, *б*). Положение их в структуре кварца было впервые расшифровано Катцем в 1962 г. Оно зависит от возмущающего действия примесных дефектов Al_i^{3+}, K^+, Na^+, Li^+ на OH_x-группировки. Вслед за Катцем исследованиями связи полос поглощения на ИК-спектрах кварца в области 3000—3800 $см^{-1}$, выяснением причин их появления занимались многие исследователи [3, 5, 7, 22, 25, 34, 41, 47 и др.]. В обобщенном виде данные этих исследований представлены в табл. 3.

Из работы [47] следует, что кварц, выросший с большой скоростью, дает ИК-спектр с диффузной полосой в области 3000 $см^{-1}$ и более интенсивные полосы — в области 3588, 3430, 3300 $см^{-1}$. На ИК-спектрах некоторых образцов кварца были отмечены полосы поглощения в области 3600—3700 $см^{-1}$. Так как присутствие воды или OH_x-групп в структуре кварца никогда не вызывает появления на ИК-спектрах полос поглощения с указанными частотами, то их возникновение связывают с присутствием других примесей, например фтора [3].

По данным ряда исследователей, ИК-спектры могут быть использованы для определения температур и давлений процесса минералообразования, а также для выявления особенностей его геохимии [47].

И.Л. Комов и М.И. Самойлович [25] предложили методику определения уровня эрозионного среза и глубины образования кварцевых тел по ИК-спектрам. По отношению интенсивностей полос поглощения на ИК-спектрах в 1977 г. Л.С. Шер и Н.Б. Бархударян выделили генерации жильного кварца, имеющие различное отношение к золотому оруденению. В.И. Якшин использовал ИК-спектроскопию кварца для оценки характера перераспределения примесей в нем при процессе грануляции. Е.И. Доломанова с соавторами в 1972 г. предложила по ИК-спектрам отличать β-кварц от α-кварца, а также выявлять параморфозы α-кварца по β-кварцу.

Природа окраски. Наиболее полно вопросы природы окраски кварца рассмотрены в трудах советских исследователей. Причиной дымчатой и морионовой окрасок, по данным И.Л. Комова, М.И. Самойловича и др. [34, 47], является присутствие центров дымчатой окраски, возникающих при воздействии ионизирующей радиации на AlO_4-центр, который присутствует в кристаллах кварца с изоморфным замещением кремния алюминием. При таком замещении избыточный отрицательный заряд компенсируется межузельными ионами лития, натрия или протоном. Облучение приводит к ионизации с образованием $[AlO_4]^{5-}$-дырочного парамагнитного дефекта, являющегося центром дымчатой окраски. Выбитый при этом электрон захватывается различного рода электронными ловушками, а щелочные ионы диффундируют от Al-центра к ним. В тех случаях, когда компенсатором заряда при гетеровалентном изоморфизме является только протон, центр дымчатой окраски при комнатной температуре не образуется, и кристалл остается бесцветным.

Детальное изучение спектра радиационной окраски, выполненное

К.Нассау и Б. Е. Прескоттом в 1955 г., показало, что в отдельных случаях получается не обычная дымчатая, а зеленовато-желтая окраска. Она же наблюдалась у некоторых дымчатых-облученных кристаллов после отжига при 140—200 °С. В ряде случаев вместо зеленовато-желтой возникала светлая голубая или голубовато-зеленая окраска.

Особенность морионов заключается в том, что это кристаллы кварца, в которых наряду с высокой концентрацией структурной примеси алюминия имеет место повышенное содержание различного рода кислородных и кремниевых вакансий и дивакансий [34].

Известно, что цитрины бывают трех типов. Первый тип цитринов имеет желтую окраску, связанную с примесью ионов железа. Они получаются при отжиге аметистов при температуре 450—500 °С. Второй тип цитринов зеленовато-желтой окраски имеет природное радиационное происхождение. При облучении цитрина литий и водород не диффундируют от парамагнитного центра, а остаются вблизи дефектного тетраэдра. Третий тип цитринов получается отжигом морионов при температуре около 300—320 °С. Такие цитрины имеют различные оттенки желтого цвета, к которому иногда примешивается устойчивая аметистовая окраска, так как она сохраняется при отжиге морионов до 400 °С. Природа цитриновой окраски этого типа различна и связана с различными электронно-дырочными центрами (ЭДЦ), которые локализованы на дефектах типа вакансий и дивакансий кислорода и кремния, а также межузельного кислорода.

Природа окраски аметиста изучается довольно интенсивно на протяжении последних тридцати лет. Последние данные о природе цвета этого минерала приведены В.Б. Балакиревым совместно с другими исследователями, а также В.С. Балицким и Е.С. Лисицыной.

Изучение спектров ЭПР в аметистах показало, что "... Fe_I^{3+} находится в положениях, соответствующих кристаллографическим позициям кремния, а Fe_{II}^{3+} — в междоузлиях. Аметистовая окраска возникает при γ-облучении образцов, в которых присутствует железо (Fe_I^{3+} — *Г.Ю.*), хотя прямая связь окраски с наличием этих центров не прослеживается..." [34, с. 59]. Однако, как выяснилось, ни Fe_I^{3+}, ни Fe_{II}^{3+}, ни Fe_{III}^{3+} не относятся непосредственно к центру аметистовой окраски, но она возникает при трансформации трехвалентного железа в необычное четырехвалентное состояние после облучения. Поэтому "...есть все основания считать, что центрами аметистовой окраски являются ионы железа в необычном состоянии (Fe^{4+})" [Там же, с. 61].

Кроме того, полагают, что щелочные ионы вообще не входят в структуру центров аметистовой окраски и что компенсаторами зарядов являются протоны.

Скорее всего вопрос о природе окраски аметистов нельзя признать окончательно решенным. В связи с тем, что оптические спектры поглощения дают четыре полосы, каждая из которых обусловлена, вероятно, определенным типом точечных дефектов, следует полагать, что фиолетовая окраска аметистов есть результат смешения, как это предполагается для морионов. Определенную роль играют

и ОН-группы: их концентрации коррелируют с интенсивностью окраски.

Относительно розовой окраски кварца существуют разноречивые представления. А.Е. Ферсман приводит данные Беренда о том, что розовый цвет кварца из Южной Африки может появляться в жилах, выходящих на дневную поверхность, на глубине же он имеет молочно-белый цвет. В то же время известно, что розовый кварц гидротермальных жил может возникать за счет метаморфизма розовато-фиолетового или аметистового кварца так же, как молочно-белый за счет водяно-прозрачного.

Результаты детальных исследований 27 образцов розового кварца, опубликованные в 1971 г. Денненом Вильямом и Паккетом Анита, показали, что природа его окраски может быть двойственной. С использованием ЭПР выявлено, что она связана как с появлением ЭДЦ при замещении кремния на Ti^{3+} и Al^{3+} (в качестве компенсаторов зарядов в этом случае выступают Li^+ или H^+ и Li^+), так и с появлением астеризма, обусловленного рассеиванием света включениями игл рутила.

На сегодняшний день принципиального решения вопроса о причинах розовой окраски кварца не получено. Но проблема эта важна в связи с тем, что розовые кварцы в месторождениях малоглубинной золото-серебряной формации занимают определенное положение в рудообразующем процессе и могут быть типоморфными для определенных его стадий, равно как и фиолетовые, характеризующие заключительные моменты главной стадии формирования рудных жил.

Об изменчивости окраски в процессе кристаллизации и роста кристаллов. Давно замечено, что не только формы, но и окраска кварца закономерно изменяются по мере изменения состава, скорости и температур кристаллизации кварца. Еще А.Е. Ферсман показал общие тенденции в изменчивости форм кристаллов и агрегатов и окраски последовательно образующихся выделений кварца.

В общем случае последовательность кристаллизации кварца различной окраски выглядит такой, какой она представлена в табл. 4.

Из таблицы видно, что появление кварца различной окраски повторяется на фоне общего изменения (уменьшения) температуры. Эта особенность отчетливо указывает на ритмичное изменение концентраций кремнезема и pH раствора, так как образование щелочных дымчатых разностей кварца и морионов происходит в существенно щелочной среде, дымчато-цитриновых — при относительно меньшей щелочности, а аметистов — при относительном увеличении щелочности и повышении окислительно-восстановительного потенциала [5, 34, 46].

В большинстве случаев в кристаллах из гидротермальных хрусталеносных месторождений Среднего Урала, Сибири, Казахстана и Памира наблюдается усиление интенсивности окраски к концу их роста: ранние зоны роста обычно бесцветные или цитриновые, а ближе к вершинам появляются дымчатые зоны, чередующиеся с цитри-

Таблица 4

Изменчивость окраски кварца в ходе эволюции пегматитового процесса

Температуры кристаллизации, °С	Модификация	Цвет	Зона пегматита	Геофаза по А.Е. Ферсману
700—650	β	Серый, светло-серый	Аплитовая, графическая	*B*, расплав
650—575		Серый, дымчато-серый (сотовый)	Пегматоидная	
575—500	α	Морионовый	Блоковая, заморыши	*C—D*, раствор — расплав, флюид — расплав
		Серый, розовый	Мономинеральные блоки, кристаллизация из остаточных растворов в пустотах кварцевого ядра	*E*, флюид — раствор
500—420		Розовый, цитриновый	Растворения	*F—G*, пневматолито-гидротермальные (прерывистый рост, зональные кристаллы, залечивание сотовых трещин)
420—360		Бесцветный, цитриновый, дымчатый, преимущественно дымчатый	Кристаллизации	
360—250		Зональные кристаллы. Дымчатый, цитриновый, дымчато-цитриновый		*H—I*, гидротермальные. Соответствует минералообразованию в хрусталеносных кварцевых жилах
250—100		Светло-дымчатый, аметистовый		

новыми и бесцветными. Головки, как правило, дымчатые, иногда обрастающие аметистом.

В хрусталеносных пегматитах (Казахстан, Урал), по В.С. Балицкому, гуще в дымчатый цвет окрашены самые ранние зоны роста кристаллов кварца: в направлении к их вершинам интенсивность окраски ослабевает, и более поздние зоны часто имеют цитриновый цвет, бесцветны или обрастают аметистом. В этих условиях направленное изменение окраски кварца связано с уменьшением pH в процессе эволюции минералообразующей среды.

В крупных кристаллах кварца из пегматитов и пневматолитовых миарол наряду с общим уменьшением интенсивности окраски от начала к концу кристаллизации, происходившей при постепенном уменьшении температуры, наблюдается ритмичное чередование раз-

неокрашенных зон — дымчатых, дымчато-бурых или дымчато-зеленоватых. Такая ритмика характерна для крупных кристаллов кварца (например, в Ак-Джайляу).

Зональность и изменчивость окраски, выражающиеся в чередовании темно- и светлодымчатых зон и бесцветными или цитриновыми, по-видимому, как показывают данные В.С. Балицкого [46], связаны не столько с изменением температуры, сколько с концентрацией примесей Al^{3+}, Na^{+}, Li^{+}, Fe^{3+} и некоторых других элементов, способ вхождения которых в кристаллы определяет окраску последних, а также с изменчивостью pH. Поэтому изучение изменчивости окраски, как и указывал А.Е. Ферсман, необходимо как для понимания условий образования кварца, так и для выявления его типоморфных признаков.

Термолюминесценция (ТЛ). По данным А.С. Марфунина [30], ТЛ кварца имеет рекомбинационный характер. Она обусловлена существованием дырочных центров O^{-} — Al/M^{+}, где M^{+} — Li^{+}, Na^{+}, H^{+}, с которыми связаны пики в области 200—220 °С, и электронных центров Ti^{3+}, Fe^{3+} и некоторых других, которые могут быть ответственны за пики в области 280—300 °С.

Условием ТЛ является наличие центров захвата и захват электронов определенных энергий, который происходит при облучении — природном или реакторном. Количество находящихся на определенном энергетическом уровне запрещенной зоны электронов зависит от дозы облучения. Последняя может быть интенсивной, но кратковременной, или относительно умеренной и длительной.

По А.Н. Таращану [44], в процессе ТЛ должны одновременно участвовать три этапа ЭДЦ: а) центры захвата электронов и дырок; б) центры электронно-дырочной рекомбинации; в) центры излучения. Иногда центры рекомбинации являются одновременно и центрами излучения.

Анализ работ И.Л. Комова, Л.Н. Хетчикова, А.С. Марфунина, А.Н. Таращана, А.И. Серебренникова, В.И. Павлишина и других исследователей показывает, что ТЛ в кварце связана с ЭДЦ, значительная часть которых обусловлена структурными примесями за счет изоморфизма.

К настоящему времени выявлено, что природная, или естественная, термолюминесценция (ЕТЛ) у кварца происходит в определенных температурных интервалах (максимумы ЕТЛ имеют определенные температуры). Имеющиеся опубликованные данные сведены в табл. 5, в которой показаны связи температур максимумов ЕТЛ с определенными центрами захвата, обусловленными изоморфными примесями.

Выделяются три группы центров, рекомбинирующих при низких (124—230 °С), средних (230—320 °С) и высоких (320—380 °С) температурах. К первым относятся центры, связанные с примесями щелочных элементов (Li, Na) в интерстициальных положениях вне связи с AlO_4^{4-}-комплексом. К среднетемпературным относятся все AlO_4^{4-}-центры как в связи со стабилизующими щелочными элемента-

Таблица 5

Таблица 5

Разновидности кварца, обусловленные изоморфными примесями, центры захвата и соответствующие им температуры максимумов ЕТЛ

Центры захвата	Температура максимума													Характерная разновидность кварца
	низкая					средняя						высокая		
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}	T_{12}	T_{13}	
	124	170—180	200—210	220—230	230—242	270	280	280—300	310	310—320	320	340—350	380	
$AlO_4^-Li^+$	+					+								Из Li – Be пегматита
AlO_4^-/Na^+		+							+	+				Бесцветный и дымчатый морион (только $T_9 - T_{10}$)
AlO_4^-/Li^+			+			+ (275)	+	+						Цитрин
Al/H^+			+ (204)					+ (296)						Бесцветный
Al^{3+}/Na^+, Al^{3+}/Li^+		+	+	+			+	+		+				Дымчато-цитриновый
$AlO_4^{4-} + Cu^+$					+									Рудоносный
Fe^{3+}/Li^+								+		+			+	Аметист
Ti^{3+}/Me^+														
GeO_4^{5-}/Na^+												+		
CO, W, Mn, Au, Ag и др.								+	+	+	+	+		Рудоносный

Примечание. Знаком + обозначены температуры максимумов ЕТЛ, соответствующие примесным дефектам.

ми или водородом, так и без них. В этом же интервале температур термолюминесцирует кварц с Al-центром в ассоциации с медью или никелем, возможно, серебром и другими металлами первой группы, а также Fe^{3+}/Li^{+}-центры. К высокотемпературным относятся титановые и германиевые центры, а также, по А.И. Серебренникову, центры с Co, W, Mn, Au, Sn и другими рудными элементами.

В результате обобщения данных по изучению ТЛ кварца выяснилось, что изменчивость этого свойства может быть использована для отнесения его к образованиям определенных генетических типов [38], определенным генерациям [44, 45, 47], а также для оценки принадлежности кварца к продуктивным минеральным ассоциациям [14, 49]. В связи с тем, что с глубиной увеличиваются концентрации алюминиевых центров [11], становится реальным использование закономерного увеличения с глубиной интенсивности ЕТЛ, установленного нами в 1972 г., для решения ряда задач теоретической и прикладной минералогии.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Пьезоэффект. Кварц является одним из самых совершенных пьезоэлектриков. По данным Г.П. Воларовича, Е.И. Доломановой, А.Б. Успенской и других исследователей, величина пьезоэлектрического модуля кварца варьирует от $0{,}338 \cdot 10^{-15}$ до 676×10^{-15} ед. СИ. Поскольку пьезоэффект обладает значительной анизотропией, решающее значение при его использовании в геологоразведочной практике имеет изучение пьезоструктур. В частности, О.И. Широкий и Е.В. Смехова и другие исследователи на примере золоторудных месторождений Забайкалья показали связь пьезоструктур, их особенностей с геологическими условиями образования и существования кварцевых жил.

Диэлектрическая проницаемость (ДП). Это свойство, как и диэлектрические потери ($tg\delta$), относится к числу таких структурночувствительных свойств, в изменении которых решающую роль играют точечные дефекты [47]. Как уже указывалось, наиболее распространенным дефектом является Al-центр. Диэлектрические потери и значительная часть механических потерь в кварце при комнатной температуре связаны с миграцией ионов (Na^{+} или Li^{+}), локализованных вблизи Al-центра.

Первые исследования диэлектрических свойств природного кварца выполнены Е.В. Рожковой и Л.В. Проскуровским в 1957 г., а затем повторялись неоднократно [31]. Выяснилось, что величины ДП, измеренные на частоте 50 Гц, зависят от метода определения, особенностей кварца и варьируют от 4,40 до 5,40 в пластинах из кристаллов аметиста и дымчатого кварца. Измерение диэлектрической проницаемости в пластинах, вырезанных из кристаллов, параллельных осям *a* или *c*, резонансным методом показало, что значительные изменения ДП (4,7 — 10,5) связаны с перемещением примесных ионов в структурных и дефект-каналах кварца. Н.Н. Васильева и С.Г. Со-

ломкина [9] максимальные величины ДП определили в пластинах из дымчатых и фиолетовых кристаллов (4,53 — 4,56 и 4,64 — 4,77 соответственно). Повышенные значения ДП у окрашенных кварцев связаны с примесными ионами Na^+ или Li^+, которые компенсируют дефицит зарядов при замещении кремния в раухтопазе и аметисте на Al^{3+} и Fe^{3+}.

ДП порошков кристаллов, реже жильного кварца молибденовых, оловорудных, вольфрамовых и пегматитовых месторождений, измеренная методом Больцмана — Биллитцера на частоте 50 Гц, варьирует, по данным многих исследователей, в пределах 4,5—6,0. Измерение этим методом дает незначительные, но относительно устойчивые изменения ДП у кварца разных генераций, но эти различия невелики и не всегда могут быть использованы на практике.

Для выявления типоморфных признаков кварца опробованы резонансные методы определения ДП в порошках без использования токсичных иммерсионных сред [22].

При изучении частотной зависимости ДП и $tg\delta$ [22] обнаружилось, что кривые этих зависимостей отличны от теоретических и характерны для кварца, образованного в различных условиях (с различными *PTX*-параметрами).

В последние годы для решения ряда минералогенетических задач изучается изменчивость электропроводности кварца при нагревании [22, 43 и др.].

ПРОЧИЕ СВОЙСТВА

Плотность. Плотностные свойства кварца рассмотрены М.Я. Кацем и И.М. Симановичем в работе "Кварц кристаллических горных пород". Оказалось, что плотность кварца в зависимости от генезиса варьирует от 2,630 до 2,660 г/см^3. Обработав огромный материал, указанные авторы выявили, что модальные среднеарифметические величины плотности наименьшие у жильного кварца и максимальные у кварца из метаморфических пород.

Плотность в кристаллах [7] варьирует от 2,630 до 2,650 г/см^3, увеличиваясь у дымчатых и цитриново-дымчатых разностей. Жильный кварц хрусталеносных областей имеет умеренную плотность (2,642—2,649 г/см^3). В работе Н.Н. Васильевой и С.Г. Соломкиной [9] приведены значения плотности от 2,62 до 2,65 г/см^3. При этом наибольшая плотность определена у кристаллов, а наименьшая (в среднем 2,63 г/см^2) — у жильного кварца из гидротермальных месторождений.

Микротвердость. Определение микротвердости кварца не представляет собой особенно трудной задачи, но, как было отмечено С.И. Лебедевой еще в 1963 г., измерению ее мешают побочные эффекты, получившие название микрохрупкости. С.И. Лебедева дает вариации от 1003 до 1212 кПа при среднем значении 1113 кПа (по 6 образцам). Л.Н. Хетчиков, И.Л. Комов и Б.А. Дороговин в 1971 г. дали пределы вариаций средних значений от (1143,3±17) кПа

у сотового кварца до (1546± 33) кПа у прозрачных и полупрозрачных центральных частей кристаллов. Наблюдалось увеличение микротвердости в одном кристалле от его основания к головке от 1166,6 (± 25,4) до 1230,9 (± 14,3) кПа. Они показали, что микротвердость уменьшается с увеличением структурной примеси алюминия, а также около газово-жидких и твердых включений, что может быть объяснено большей вероятностью вхождения примесей в структуру в этих участках кристаллов.

А.В. Громов, В.П. Новиков, В.И. Свешникова и Ф.П. Мельников обнаружили прямую зависимость между величиной микротвердости и температурой гомогенизации газово-жидких включений, но связи между валовыми концентрациями алюминия, магния и других элементов-примесей и величиной микротвердости не выявили. Такие результаты связаны скорее всего с тем, что на твердость оказывают влияние лишь структурные примеси.

В целом вариации микротвердости кварца могут указывать на условия его образования, а в отдельных случаях могут быть и типоморфными признаками.

ВКЛЮЧЕНИЯ В КВАРЦЕ КАК ТИПОМОРФНЫЕ ПРИЗНАКИ

Основные достижения в области изучения условий минерало- и рудообразования получены на основе исследования включений в кварце. В кварце среди всего многообразия включений по агрегатному состоянию выделяются: раскристаллизованные и кристаллофлюидные; газовые (существенно газовые, газово-водные, углекислые) и жидкие (водные растворы, водно-углекислые, коллоидно-водные) [16].

Состав включений. В итоге изучения состава водных вытяжек и химического анализа индивидуальных включений получены представления о сложном составе минералообразующих растворов, в которых главными компонентами являются кремнезем, вода, углекислый газ, хлориды натрия и калия. После того, как было установлено, что в газово-жидких включениях гидротермального кварца постоянно присутствуют бикарбонат и хлорид натрия, а также кремнезем, количество которого находится в прямой зависимости от концентраций указанных компонентов [21], успешно были решены вопросы промышленного синтеза этого минерала.

Экспериментами установлено, что при анализе состава газово-жидких включений методом водных вытяжек при обычных температурах в раствор переходят преимущественно легкорастворимые соли (хлориды, сульфаты), а силикаты и алюмосиликаты остаются во включениях. Поэтому данные анализов водных вытяжек не отражают истинных концентраций. Несмотря на это, у многих исследователей сложилось представление о низкой концентрированности гидротермальных растворов. Тем не менее значительная часть исследователей (А.И. Захарченко, Л.Г. Пальмова, Л.А. Копнева, Ж. Батгельдер, Н.Е. Учаймешвили, Н.И. Хитаров и др.) отказывается от пред-

ставлений о слабоконцентрированных гидротермальных растворах, полагая, что кремнезем переносится в сильноконцентрированных (50—95 %) солевых растворах-расплавах. Кремнезем и другие компоненты, по мнению И.Г. Ганеева, в процессе переноса находятся в виде гидрооксокомплексов. По данным В.Б. Наумова и И.Л. Ходаковского, растворению и переносу силикатного вещества в высокотемпературных гидротермальных растворах способствует гидролиз, истинная роль которого оценивается только в последние годы.

Во включениях в кварце диагностированы углекислота, окись углерода, сероводород, азот, благородные газы, углеводороды. Определено, что изменчивость концентраций газов имеет минералогенетическое значение. Величины соотношения воды и углекислоты закономерно изменяются от начала к концу гидротермального процесса и могут быть, по данным Ж.А. Симкив, критериями оценки уровня эрозионного среза. Н.П. Ермаков в 1978 г. привел примеры использования углекисло-водометрического метода при детальных поисках кварцевых тел и зон гидротермальных изменений. Обобщения Н.И. Андрусенко, С.А. Андриановой, Ю.В. Ляхова и других исследователей показали, что во включениях в кварце золоторудных месторождений присутствуют щелочно-галогенные, щелочно-бикарбонатно-углекислые и щелочно-сульфатные растворы. При этом кварц среднеглубинных рудных формаций характеризуется сульфатно-хлоридными или бикарбонатно-хлоридными растворами, а малоглубинных — бикарбонатно-кальций-магниевыми или калий-натриевыми растворами с подчиненной ролью хлоридов. Для кварца золоторудных формаций типично также присутствие наряду с углекислотой азота при подчиненной роли H_2S, SO_4^{2-}, NH_3, HCl, Hf, водорода, метана и кислорода. Высокие концентрации фтора наряду с хлором во включениях в кварце, по данным Ю.П. Трошина, С.М. Бойко и др., характерны для редкометального оруденения. Все большая роль отводится метеорным водам в гидротермальном процессе минералообразования. Для ее оценки к настоящему времени выполнен уже значительный объем работ по изотопам кислорода в кварце, в частности Я.Н. Белевцевым, В.Е. Ветштейном, Ю.А. Борщевским, Е.И. Доломановой и другими исследователями. В целом доля метеорного кислорода оказывается небольшой, хотя и указывает на вероятность смещения магматогенных растворов и метеорных вод.

С помощью микрозонда во включениях определено около 30 элементов. Основная масса рудных элементов связана в хлоридах, реже сульфатах, окислах или карбонатах [1, 15, 46 и др.].

Анализ данных по водным и микроводным вытяжкам из включений в кварце определенно показал высокую их насыщенность литофильными и рудными элементами, достигающую нередко 30—60 % их массы, что позволяет сопоставлять эти включения с термальными рассолами и искать в принципе единые источники рассолов и гидротермальных растворов.

С.А. Куршев, В.Н. Труфанов [26], В.И. Васильев и другие исследователи с помощью электронных микроскопов установили, что

гидротермальные рудоносные кварцы отличаются от пегматитовых более сложными формами газово-жидких включений и их разнообразием.

Температуры гомогенизации. Для оценки температур и агрегатного состояния минералообразующих систем на переходе от магматических к гидротермально-пневматолитовым особое значение приобретают твердые расплавные включения. Оказалось, что ранний кварц пегматитов содержит включения, состоящие из твердой (70—80 %), газовой и водной фаз. Твердая фаза гомогенизируется в образцах из внутренних зон пегматитов при 650—670 °С и при охлаждении переходит в алюмосиликатное стекло с резким преобладанием кремния, содержащее Li, Rb, Cs и F.

Во внутренних существенно кварцевых зонах пегматитов, по данным А.И. Захарченко, обычны включения, 50—80 % объема которых занимают кристаллы-узники. Гомогенизация таких включений происходит при 450—550 °С и выше с образованием водно-силикатного рассола.

Верхняя температурная граница гидротермального минералообразования, в частности кварцевых жил, изменяется (для разных месторождений) в пределах 480—580 °С. Эти данные вполне согласуются с частыми находками в рудных кварцевых жилах реликтов β-кварца в α-кварце (Е.И. Доломанова, А.В. Кокин и др.).

Средние значения температур образования кварца рудных месторождений находятся в пределах 500—400 °С для допродуктивных генераций, 380—230 °С для продуктивных и 320—50 °С для послепродуктивных стадий практически всех эндогенных месторождений большинства рудных формаций, тогда как давления имеют широкие пределы вариаций — от 2,5 до 150 МПа. Средние значения температур для безрудного жильного кварца, претерпевшего метаморфизм (данные С.Ш. Юсупова, Е.П. Мельникова, И.А. Хайретдинова), 275—525 °С при давлении 125—380 МПа.

Появились данные (Ф.Я. Корытов, М.Н. Кандинов, Л.И. Шишакова и др.) об аномальной вертикальной температурной зональности, согласно которой в ряде флюоритовых, оловорудных и золоторудных месторождений малоглубинной формации температуры гомогенизации включений в кварце верхних и периферических частей жил больше, нежели в кварце срединных частей, и уменьшаются сверху вниз до определенных глубин.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ЖИЛЬНОГО КВАРЦА И ПРОБЛЕМА ТИПОМОРФИЗМА

Важнейшим результатом изучения кварца явилось то, что в основном определены вариации его состава, структуры и главные причины изменчивости важнейших свойств. Оказалось, что структура кварца способна изменяться в зависимости от структурных примесей, которые являются следствием изоструктурного гетеровалентного изоморфизма. Одновременно определена ограниченная изоморфная

вместимость кварца. Размеры параметров элементарной ячейки зависят не только от наличия или отсутствия и размеров иона-заместителя (c_0), но и от интерстициальных примесей компенсаторов (a_0). Вероятность вхождения изоморфных примесей зависит от условий кристаллизации, определяющихся не только температурной, но и скоростью ее изменения, степенью пересыщения растворов и изменчивостью pH.

Не менее важным итогом изучения структуры и кристаллохимии кварца с помощью метода ЭПР и направленного выращивания кристаллов с заданными примесями явилось представление о возможности вхождения в решетку кварца и удерживания в ней Cu, Ag, Au, Sn, Ge, W, Co и других рудных элементов. Это свойство в совокупности с рыхлостью решетки, обусловливающей вероятность миграции указанных элементов сквозь твердый кристаллический кварц, дает основание как для теорий, объясняющих удивительно устойчивые парагенезисы с кварцем минералов Sn, W, Au, Ag и др., так и для решения проблемы миграции и переотложения этих элементов в теле кварцевых жил. Это, в свою очередь, дает ключ к пониманию отдельных аспектов типоморфизма состава.

Достаточно перспективным итогом изучения структуры кварца на молекулярно-агрегатном уровне становится представление о совершенстве кристаллического строения (СКС), которое является одним из критериев рудноформационного анализа. С проблемой СКС связаны укрепляющиеся у исследователей концепции с преобразовании и постепенном упорядочивании жильного силикатного материала в твердом состоянии после быстрого затвердевания и кристаллизации флюидов высоких концентраций существенно кремнеземистого состава, что особенно ярко проявляется в жильных близповерхностных месторождениях золота, серебра, олова, а также кварц-флюоритовых и кварц-адуляровых ритмично-слоистых или скелетных, каркасных, пластинчатых существенно кварцевых агрегатах.

Использование метода ЭПР и зонной теории, представлений об ЭДЦ позволило выяснить природу цветовых разностей кварца, выработать относительно удовлетворительные модели центров ТЛ кварца. Стало возможным рациональное использование эффекта термолюминесценции как естественной (ЕТЛ), так и индуцированной. Пессимизм относительно применимости ТЛ для решения многих геолого-минералогических задач сменила уверенность на основе знания сути самого явления. Выявленные в кварце E_1-центры, связанные с радиоактивным облучением кварца в недрах, возможность диагностики и определения их концентраций с помощью ЭПР-спектрометров становятся важным орудием исследования потенциальной рудоносности геологических объектов, а также их относительного возраста.

Исследования $\alpha - \beta$-превращений привели к пониманию сложности этого явления, убедили в широком температурном диапазоне инверсии и показали зависимость ее температур от типа изоморфизма и условий образования кварца.

Определенным вкладом в понимание важнейшей роли различных форм воды в кварце стало систематическое изучение его ИК-спектров.

Путем применения онтогенического метода изучения природного кварца и использования экспериментальных данных по выращиванию его кристаллов в различных *PTX*-условиях и с различными примесями определено, что морфология его кристаллов, ускорение или замедление роста определенных граней, закономерно изменяясь по мере изменения температур от короткопризматических к длиннопризматическим и обелисковидным, зависят тем не менее от концентраций кремнезема и pH среды: в сильнощелочных условиях растут изометричные кристаллы, а в слабощелочных — длиннопризматические. Выявлен генезис искаженных кристаллов: асимметричных, скрученных, многоглавых. Это увязано как с симметрией энергетического поля минералообразующей среды, так и с процессами расщепления, приводящими к дисимметризации. Последняя объясняется наличием дефектов в кристаллах на атомно-молекулярном уровне.

Большое значение для понимания условий образования и существования кварцевых жил имели исследования строения агрегатов жильного кварца. Результаты изучения деформационных структур и структур перекристаллизации, направленности изменчивости состава (особенно водного, газового и микроэлементного) показали решающую роль пластических деформаций при процессах переотложения и концентрации рудных элементов, в первую очередь золота, а также для образования гранулированного кварца и хрусталеносных метаморфогенно-гидротермальных жил.

Исследование структур и текстур кварцевых агрегатов первичной кристаллизации показало, что строение их, изученное на разных уровнях от кристаллита до группы агрегатов, является важнейшим инструментом познания механизма и скорости кристаллизации, консистенции минералообразующей среды и глубин образования. Многие исследователи вновь пришли к необходимости признания на определенных этапах эволюции минералообразующих флюидов состояния, близкого к коллоидному. Особое значение имело изучение ритмично-слоистых агрегатов, распространенных в близповерхностных месторождениях. Для таких агрегатов типичной оказалась ритмичная изменчивость самих текстур от сложных к простым от начала к концу кристаллизации. Не менее типично для таких сложно построенных агрегатов и ритмично направленное изменение в них состава и свойств как существенно кварцевых агрегатов, так и самого кварца.

В целом анализ состояния изученности вариаций структур, состава и свойств кварца показал, что уровень знания их природы позволяет в настоящее время подойти не только к осознанной постановке задачи выявления наиболее типичных вариаций этих особенностей для месторождений определенных рудных формаций, но некоторые из них уже признать типоморфными и использовать для решения минералогенетических и прикладных вопросов.

Для жильного кварца проблема типоморфизма имеет следующую специфику, определяющуюся объектом исследования:

а) образование и существование его в широком диапазоне геологических условий и процессов;

б) многообразие проявления его чисто внешних признаков, изменчивость которых связана с условиями кристаллизации и последующих преобразований;

в) динамичность конституции агрегатов, легко реагирующих на изменение внешней среды, способность к переотложению и регенерации;

г) определенная рыхлость кристаллической структуры, позволяющая ей: существовать в различных состояниях относительной метастабильности; реализовать широкий по спектру элементов, но ограниченный по вместимости изоморфизм; образовывать большое число дефектов структуры;

д) аномалии свойств, обусловленные примесями (ТЛ, дихроизм, не свойственные идеальной структуре ИК-спектры, вариации диэлектрической проницаемости и электропроводность);

е) различная вероятность появления дефектов, обусловливающих состав и свойства реальных индивидов и агрегатов кварца, в зависимости от скорости кристаллизации, pH минералообразующих растворов, их концентрации и состава, глубин образования, рудной нагрузки.

Специфические черты кварца дают основание ожидать существования устойчивых типоморфных признаков трех групп: а) структурно-текстурных (включая СКС), б) состава, в) свойств.

Группы типоморфных признаков выделяются и рассматриваются с трех позиций:

а) рудноформационной принадлежности кварцевых жил и тел;

б) отношения внутри каждой рудной формации к рудоносным или безрудным телам;

в) изменчивости их по вертикали с целью выявления возможности использования для оценки уровня эрозионного среза.

Глава II. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ТИПОМОРФИЗМА КВАРЦА

Многообразие свойств кварца определяет широкий круг методов его изучения. Выявление типоморфных признаков, изменчивости состава и свойств кварца в зависимости от вмещающей среды, времени и глубины образования требует соответствующего подхода к организации и проведению минералогического опробования.

МЕТОДЫ СБОРА КАМЕННОГО МАТЕРИАЛА

В основе опробования лежат два принципа: представительность проб для последующей обработки полученных данных методами математической статистики и возмож ть прослеживания

изменчивости состава и свойств в пространстве. Первое достигается определением оптимального числа проб в пункте, сечении или разрезе, а второе — минералогическим картированием, в результате которого возможно равномерное распределение проб по всему пространству рудного тела, жилы или рудного поля. Для прослеживания изменчивости состава и свойств жильного кварца в пределах жил или рудных тел сбор каменного материала производится вкрест их простирания через определенные промежутки в соответствии с системой разведочных или эксплуатационных горных выработок по вертикали и горизонтали. В каждом из сечений образцы отбираются так, чтобы проследить изменчивость текстур, состава и свойств кварца от контактов жилы с вмещающими горными породами к центральной части жилы.

Для выяснения направления роста индивидов и агрегатов и ориентировки в пространстве определенных структурных типов агрегатов отбор крупных образцов и штуфов сопровождается обозначением положения их в объеме жил. Если позволяют горнотехнические условия, нужно отбирать образцы и для выявления связи состава и свойств кварца с концентрацией полезного компонента. Детально опробуют участки резких изменений минерального состава жил и вмещающих горных пород. Общее число образцов для отдельных месторождений варьирует от двух-трех десятков до многих сотен в связи с различной степенью их разведанности или отработанности, а также размеров и доступности. Например, приводимые в настоящей работе данные по Балейскому рудному полю получены на основе изучения 800 образцов.

Одним из условий успешного использования типоморфизма при прогнозно-оценочных работах является организация сбора и хранение типичного каменного материала на всех этапах геологоразведочных работ (от поисково-оценочных до детальной разведки и эксплуатации месторождения).

В участках детализации в каждом сечении число образцов определяется числом перемежающихся разновидностей и мощностью жилы. Расстояние между сечениями выбирается в зависимости от состояния выработок, изменчивости структур и текстур кварца, а также рудоносности в конкретном участке жилы. Это позволяет получить представительный материал по изменчивости всех параметров по вертикали и горизонтали в блоке и за его пределами.

Непосредственные полевые наблюдения и сбор кварцевого каменного материала имеют особенности в зависимости от рудноформационной принадлежности месторождений. В грейзеновых и жильных месторождениях вольфрама и олова основную информацию об условиях минералообразования и типоморфных признаках дают кристаллически-зернистые агрегаты и кристаллы кварца. Особенности индивидов, в том числе их цвет, морфология, зональность, выявляемая при облучении, типы ассоциирующих с ними слюд дают основную полевую минералогенетическую информацию и основу для выявления типоморфных признаков. При полевом изучении жильных квар-

цевых агрегатов среднеглубинных золоторудных месторождений особое внимание следует уделять не индивидам, а их срастаниям, структурам и текстурам, характеру зернистости, соотношению шестоватых и массивных текстур, появлению грануляционного перерождения, присутствию сульфидов или сульфосолей.

Исследование месторождений малоглубинных формаций требует уже в полевых условиях тонкого и детального изучения структурно-текстурных особенностей жильного существенно кварцевого выполнения жил. Большое минералогенетическое значение приобретают характер ритмичности, последовательность смены слюдисто-кварцевых, адуляр-кварцевых или собственно кварцевых агрегатов, наличие или отсутствие пластинчатых или шестоватых агрегатов, поведение зон развития аметистовидного кварца, место золота, серебра, сульфидов и сульфосолей в общем процессе минералообразования. При детальных исследованиях, целью которых является определение механизма минералообразования, необходимо тщательное описание каждой зоны и каждого слоя и сопровождение его отбором крупных ориентированных в пространстве образцов.

МЕТОДЫ ПОДГОТОВКИ МАТЕРИАЛА К АНАЛИЗУ

Образцы изучаются визуально, определяется их принадлежность к той или иной структурно-текстурной разновидности. Из всех разновидностей готовят прозрачные шлифы преимущественно больших размеров для прослеживания изменений в пределах сложно построенных агрегатов.

Для изучения состава и свойств отдельных разновидностей кварца готовятся монофракции или, где их выделить невозможно, легкие фракции, на 95—98 % состоящие из кварца. Ритмично-слоистые агрегаты разрезаются на тончайшие пластины перпендикулярно к слоистости, из пластин выделяются для анализа отдельные слойки.

Из отдельных образцов готовятся протолочки с целью определения количества рудных минералов. Легкая их фракция используется для получения монофракций кварца. Количество монофракций, шлифов, аншлифов, пластин и других препаратов зависит от объема опробования по каждому объекту.

Схема подготовки проб к анализу включает серию операций (рис. 2). Готовить фракции различной размерности путем рассева одной измельченной пробы нельзя, так как в разных классах будет различное количество примесей полевых шпатов, слоистых силикатов, рудных минералов, которые оказывают существенное влияние на получаемые результаты. Такая сложная и длительная подготовка проб необходима при изучении кварца новых объектов, поскольку неизвестно, как будут отличаться состав и свойства у различных структурно-текстурных разностей агрегатов жильного кварца.

В тех случаях, когда исследователь такими данными уже располагает, подготовка проб сокращается, и часто достаточно исследовать только общие пробы. Но серию образцов в количестве 20—

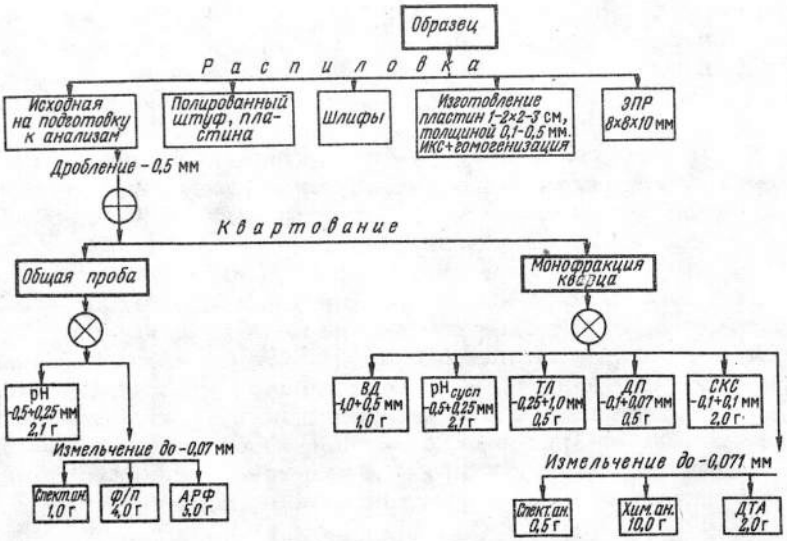


Рис. 2. Схема подготовки проб кварца к анализу для выявления его типоморфных признаков

30 шт. подготовить и исследовать в полном объеме необходимо для всех отличающихся агрегатов.

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ КВАРЦА

Комплекс методов включает изучение структур и текстур, состава, примесей, рудоносности, состава газово-жидких включений, pH суспензий и ряда физических свойств.

Все методические приемы при изучении кварца надо выбирать с таким расчетом, чтобы от корреляционных связей перейти к выявлению их причин. Для этого можно использовать методы ЭПР, изучение искусственной ТЛ, теплот фазовых переходов, ИКС при изменении температур от —196 до +700 °С, изменение удельной электропроводности при нагревании до 900 °С и давлениях от атмосферного до 20 МПа, процессы газоотделения при нагревании от 20 до 600 °С и др.

Определение состава. Валовый состав всех примесей определяется обычным приближенно-количественным эмиссионным спектральным анализом на 45 элементов (испарением из угольного электрода). Количественным спектральным анализом определяются Fe, Be, Sn.

Для определения щелочей и важнейших рудных элементов используется широкий комплекс количественных химических, физических и физико-химических методов: фотометрия пламени (K, Na, Li, Cs), рентген-флюоресцентный (Rb, Th, Pb, Sr, U), атомно-абсорбционный (Ag, Au, Bi, Co, Cu, Mo, Mn, Ni, Pb, Sb), рентгено-спектральный (Nb, Ta) анализы, фотокалориметрический (Al, W, Ti) и объем-

ный (Sb) методы. Чувствительность анализов: Bi, Cs, Sb — $5 \cdot 10^{-3}$ %; K, Na, Li, Al, W, Co, Mn, Cu, Mo, Ni, Nb, Sn, Ti — $1 \cdot 10^{-3}$ %; Ta — 5×10^{-4} %; U, Th, Sr, Pb, Rb — $1 \cdot 10^{-4}$ %; Au, Ag — $1 \cdot 10^{-5}$ %.

Изучение ЕТЛ. Для изучения ЕТЛ наиболее приемлем серийный прибор "Термолюм-1". Он обеспечивает автоматическую регистрацию сильных и слабых сигналов (усиление в $10^7 - 10^8$ раз) в области 300—600 нм. В связи со слабой интенсивностью ЕТЛ кварца для достижения воспроизводимости необходимо работать с маской с наибольшим отверстием на 4-минутном режиме. Оптимальная навеска пробы для одного анализа 100 мг, фракция —0,25 + 0,1 мм. С целью получения сопоставимых результатов и контроля работы прибора необходимо пользоваться эталоном. Регистрируемые прибором кривые называются термолюмограммами.

Съемка спектров рентгеностимулированной термолюминесценции (РТЛ). Принципиальная схема аппаратуры для съемки спектров РТЛ хорошо известна [44] и конструктивно определяется имеющейся у экспериментаторов аппаратурой. Для съемки спектров РТЛ необходима специальная подготовка проб. Порошок кварца фракции —0,25 + 0,1 мм отжигается при температуре 400 — 500 °С в течение 3—4 ч, а затем облучается рентгеновскими лучами около 3 ч. Для равномерной рентгенизации всех зерен пробы лучше использовать более жесткие рентгеновские лучи на аппарате ДРУС трубкой БХВ-6 с вольфрамовым анодом при напряжении 40 кВ и токе 20 мА. После облучения пробы приобретают равномерно дымчатую окраску. Некоторые исследователи [3, 7, 24, 30, 38, 44, 47] для усиления ТЛ предварительно отжигают кварц до 400—500 °С, а затем облучают γ-лучами, например, с помощью ^{60}Co. Возбужденная ионизирующим облучением ТЛ получила название индуцированной для искусственной термолюминесценции (ИТЛ). Число возбужденных центров ТЛ зависит от числа замещенных атомов кремния и дозы облучения. Обычно состояние насыщения наступает при дозе облучения $10^6 - 10^7$ рад.

Обработка термолюмограмм. При обработке данных ЕТЛ определяют температуры максимумов (T) и интенсивность (I) в относительных единицах, определяющуюся высотой пика. Для выявления типоморфных признаков кварца определяется отношение интенсивностей ЕТЛ для соответствующих температур максимумов. При необходимости можно определить параметры рекомбинационной кинетики процесса ТЛ [44, 47].

Г.Н. Богданова в 1977 г. предложила для обработки термолюмограмм ИТЛ замерять и использовать два параметра для каждого типа свечения: S (светосумма, определяемая по площади пика) и $I_{ИТЛ}$ (интенсивность, определяемая по высоте пика). В результате исследований Г.Н. Богдановой выявлено, что по мере гидротермальной переработки жильного кварца и приближения к хрусталеносным гнездам резко возрастают S и $I_{ИТЛ}$.

Оценка степени измененности кварца вмещающих пород (K) производится по формуле $K = (S_i - S_0)/S_0 = \Delta S/S_0$, где S_i — свето-

сумма ИТЛ кварца вмещающей породы, S_0 — светосумма исследованной пробы.

Измерение электрических свойств кварца. Диэлектрическую проницаемость кварца рекомендуется измерять резонансным методом на частотах 100 кГц, 1, 10, и 100 МГц при комнатной температуре и в ходе ее изменения от 20 до 250 °С. Лучшие результаты получаются при измерениях в порошках с размером частиц —0,1 — 0,08 мм. Для групп проб, характеризующих определенный тип кварца, необходимо рассчитывать средние значения и строить графики зависимости ДП от частоты, на которой она измерялась [22].

Электропроводность удобно определять на пластинах кварца толщиной около 2 мм, площадью 3×3 см² в вакууме [22]. Результаты обрабатываются в виде графиков $\lg \sigma_v = f(1/T)$, где σ_v — удельная проводимость, T — температура, К.

Получение и обработка ИК-спектров. Съемка производится на приборах ИКС-14 с призмой LiF в спектральной области 5000—2000 $см^{-1}$ методом поглощения, UR = 20 в области 4000—2000 $см^{-1}$ или на других ИК-спектрофотометрах. Для съемки ИК-спектров готовятся полированные с двух сторон пластины толщиной 0,1 — 2,0 мм и площадью 20×30 $мм^2$. Точность определения максимумов составляет ±10—15 $см^{-1}$. Для исследования поглощения в области менее 1000 $см^{-1}$ необходимо готовить пластины толщиной менее 0,003 мм.

Съемка ИК-спектров при различных температурах [от —196 °С (жидкий азот) до +700 °С] позволяет выявить структурное состояние входящих в кварц различных форм воды. В этих случаях практикуется съемка серий ИК-спектров при фиксированных температурах с интервалами 20 — 50 °С. Сопоставление серий таких спектров дает возможность прослеживать появление или исчезновение отдельных полос поглощения, связанных с определенными OH_x-группами, ассоциированность их со щелочными элементами. Параллельное изучение газоотделения при нагревании в вакууме, в том числе паров воды, дает возможность выявить и количественные соотношения различных форм воды, углекислоты и других компонентов. Для съемки ИК-спектров при различных температурах используются различные приставки к спектрофотометрам, позволяющие изменять и фиксировать температуру на время съемки. Наряду со спектрами поглощения значительную информацию о структурном состоянии кварца дают и спектры отражения в ИК-области, получаемые с использованием специальных приставок.

В последнее время для изучения тонкой структуры кварца начинают использоваться спектры комбинационного рассеивания, которые снимаются на приборе ДФС-24 с лазерными источниками возбуждения.

Обработка ИК-спектров производится с целью определения форм воды, определения вероятной связи OH_x-групп со щелочными металлами (см. табл. 3).

Оценка концентраций воды, углекислоты и степени упорядоченности решетки кварца производится на основе обработки данных по интенсивности соответствующих полос поглощения.

На ИК-спектрах пластин кварца постоянно присутствуют полосы поглощения в области 2120—2185 $см^{-1}$ (A_1) и 2220—2270 $см^{-1}$ (A_2), которые, как уже указывалось, принято считать обертонами собственных колебаний кристаллической решетки. Отношение A_1/A_2, которое вычисляется на основе измерений интенсивностей поглощения в процентах, характеризует степень упорядоченности кварца.

Оценка концентраций общей воды, если спектр не разрешен, или определенных форм воды, если соответствующие полосы поглощения фиксированы на спектре (область 3200—3600 $см^{-1}$), производится на основе закона Бугера — Ламберта—Беера.

Полагая, что углекислота фиксируется на ИК-спектрах кварца полосой поглощения 2360—2380 $см^{-1}$ (данные Е.И. Доломановой и Е.В. Власовой, 1974 г.), можно оценивать концентрации этого компонента. Следует отметить, что таким способом выявляются скорее всего только суммарные (в дефект-каналах и газово-жидких включениях) концентрации углекислоты, но больший вклад в интенсивность полос поглощения дает, вероятно, углекислота, находящаяся в дефект-каналах.

Термический анализ кварца. При изучении жильного кварца месторождений малоглубинных формаций, который, как правило, содержит примеси слоистых силикатов — гидрослюд, хлорита, каолинита, монтмориллонита и др., необходимо контролировать их присутствие и оценивать вероятное влияние на результаты исследований, что возможно с помощью термического анализа. Методы термического анализа позволяют определять температуры $\alpha \rightarrow \beta$-перехода в кварце (по отношению к $\beta \rightarrow \alpha$-переходу K_2SO_4) и теплоты фазового перехода (в сравнении с аналогичной величиной для WO_3). Теплота фазового перехода определяется структурным состоянием кристаллической решетки, и в общем случае наиболее дефектные кристаллические системы должны иметь минимальные теплоты фазовых переходов. Для термического анализа используются установки разной степени сложности. Удобны приборы типа дериватографа, позволяющие одновременно регистрировать кривые ДТА и кривые потери веса образца при нагревании. Навеска кварца для термического исследования зависит от типа установки, количества примесей в образце, величин тепловых эффектов процессов, протекающих при нагревании. Рекомендуется работа с фракцией —0,14 + 0,045 мм. Более крупные зерна использовать нецелесообразно из-за эффекта декрепитации газово-жидких включений.

Измерение микротвердости. Методика определения изложена в работе С.И. Лебедевой, опубликованной в 1963 г. Многие вопросы методологии изучения твердости минералов, и кварца в том числе, рассмотрены в сводках А.С. Поваренных и Н.П. Юшкина. Отметим лишь некоторые особенности измерения микротвердости кварца. Для определения величин микротвердости используются приборы ПМТ-3, ПМТ-5. Специальная приставка позволяет автоматически производить вдавливание и снятие алмазной пирамиды

с исследуемого образца. Обычно при определении используется нагрузка массой 50 г. Достоверность результатов обеспечивается получением с каждого образца не менее 35 отпечатков. Полученные данные обрабатывают по общепринятой методике, в итоге получают вариационные кривые. Максимум на кривой указывает наиболее вероятное значение микротвердости. Для анизотропных по твердости минералов на кривых будет два максимума соответственно двум значениям микротвердости H_1 и H_2.

А.С. Поваренных рекомендует оценивать и использовать также и хрупкость минералов в качестве одного из признаков, обусловленных особенностями прочности. Хрупкость проявляется в различной интенсивности ореолов микротрещин вокруг отпечатков. По методике А.С. Поваренных рассчитывается суммарный балл хрупкости z по формуле $z = 0n_0 + 1n_1 + 2n_2 + 3n_3 + 4n_4 + 5n_5$, где $n_0, n_1, n_2, n_3, n_4, n_5$ — относительные количества отпечатков из общего их числа с определенной хрупкостью. Балл хрупкости присваивается на основании характера отпечатков:

без видимых трещин и сколов — 0;
одна небольшая трещина, совпадающая с продолжением диагонали отпечатка, — 1;
одна трещина, не совпадающая с продолжением диагонали отпечатка, две трещины в смежных углах отпечатка — 2;
две трещины в противоположных углах отпечатка — 3;
больше трех трещин, один-два скола у сторон отпечатка — 4;
разрушение формы отпечатка — 5.

Отпечатки с баллами хрупкости 0, 1 и 2, по А.С. Поваренных, пригодны для вычисления микротвердости. Величина микрохрупкости кварца, выраженная через суммарный балл, особенно зерен в зернистых агрегатах, является одним из критериев вероятной рудоносности.

Изучение пьезоэлектрического эффекта. При изучении пьезоэффекта различают два момента: определение пьезоэлектрических структур и измерение пьезоЭДС. Определение пьезоЭДС жильного кварца может осуществляться статическим и динамическим способами. Статический способ измерений является высокоточным, но требует высокого качества подготовки образцов и применения сложного оборудования; он малопроизводителен и поэтому находит ограниченное применение.

Динамический способ является сравнительным, значения пьезомодулей вычисляются в результате сравнения амплитуд электрических колебаний, возникших в исследуемом образце и эталоне. В качестве эталона нами использовался кварц Бом-Горхонского месторождения. Амплитуды пьезоэлектрических сигналов образца и эталона принимаются средними из четырех-шести замеров при определении пьезомодуля в одном направлении. При этом способе применяется аппаратура, в которой импульсные нагрузки на образец породы создаются с помощью пьезоэлектрических преобразователей. Разновидностью такой аппаратуры является установка ИПА-59 (импульсная переносная аппаратура). При прочих равных условиях на-

иболее точные измерения получаются в тех случаях, когда собственные частоты излучателя, образца кварца и эталона мало отличаются друг от друга. Теоретическими исследованиями и практикой работ доказано, что представительными являются образцы в виде кубиков с ребром не менее 4 см при среднем размере зерен пьезоэлектрика 2—3 мм.

Основы методики изучения пьезотекстур изложены в известных работах А.В. Шубникова, Э.И. Пархоменко и др. Для кварца возможны три типа этих текстур: в текстуре ($\infty \cdot m$) оптические оси зерен кварца образуют пояс, а одна из осей второго порядка — электрическая — совпадает с осью пояса (осью бесконечного порядка текстуры); текстура ($2 \cdot m$) отличается от первой тем, что оптические оси образуют двухмаксимумный пояс, причем максимумы ориентировки расположены под углом 90 ° или близким к нему; в текстуре (mX X $3 : m$) оптические оси образуют максимум, а оси второго порядка кристаллов расположены одноименными концами параллельно друг другу.

Из отдельных жил по их простиранию и падению отбираются ориентированные образцы кварца, из которых в трех взаимно перпендикулярных плоскостях (ba, ac и bc, где b — простирание жилы, a — падение, c — нормаль к ее плоскости) деляются шлифы. На федоровском столике замеряется ориентировка оптических осей всех зерен кварца. Данные замеров наносятся на стереографическую сетку Вульфа. Замеры по всем шлифам одного образца сводятся в единую диаграмму в плоскости ba. Затем проводятся изолинии плотностей выхода оптических осей. По рисунку диаграммы устанавливается тип кварцевого тектонита, а соответственно ему — тип симметрии пьезоэлектрической текстуры. Известно, что в кварцсодержащих образованиях при наличии даже слабой ориентировки оптических осей наблюдается также ориентировка и электрических осей. Линейная ориентировка оптических осей кварца, соответствующая S-тектониту, обусловливает тип пьезоэлектрической текстуры (mX X $3 : m$), а плоскостная, соответствующая B-тектониту, — ($\infty \cdot m$) или ($2 \cdot m$). В текстурах типа ($m \cdot 3 : m$) следует различать текстуры ориентировки роста и тектонической ориентировки. Первая образуется при кристаллизации кварца в полостях трещин. Такие условия способствуют формированию текстур роста с ориентировкой оптических осей кристаллов кварца перпендикулярно стенкам трещины. Текстура тектонической ориентировки образуется при воздействии на раскристаллизованный кварцевый агрегат тектонических напряжений.

Изменчивость пьезотекстур в пределах жил или месторождений определяется сравнением соответствующих им диаграмм или их групп.

Определение степени СКС. Детально методика определения СКС порошковым методом изложена в ранее опубликованной работе [50]. Здесь приведем ее сокращенный вариант и условия определения СКС дифрактометрическим методом, разработанным в ЗабНИИ МГ СССР Г.Т. Тумуровым.

Для исследования необходимо иметь фракцию пробы кварца (чистота 95—99 %) класса —0,071 + 0,05 мм.

Степень СКС кварца в случае использования порошкового метода оценивается по диффузности дифракционной линии (23$\bar{5}$4) на снимках порошкограммы в камере РКЭ. Причины выбора для исследования этой дифракционной линии известны [36]. РКЭ-снимки делаются на медном излучении при экспозиции 15 мин и расстоянии образец — пленка, равном 72 мм. Диаметр коллиматорной диафрагмы в камере 2 мм. Количественная оценка интенсивности и степени диффузности осуществляется с использованием регистограммы линии (23$\bar{5}$4) вдоль оси углов дифракции. Регистограмма получается на регистрирующем микрофотометре ИФО-451 от РКЭ-снимков в масштабе 1 : 10. Она может рассматриваться как РКЭ-снимок, снятый при расстоянии образец — пленка, равном 720 мм. Это дает большое разрешение *K*-дублета медного излучения, расстояние между максимумами которого примерно 19 мм. В качестве эталона используется кварц из хрусталеносного месторождения Кожим. Методика предусматривает измерение высоты максимума линии от уровня фона и ширины на уровне половины высоты пика. Величина "интегральной" интенсивности оценивается как произведение высоты максимума на полуширину пика.

Дифрактометрический метод определения СКС по характеру обработки дифрактограмм аналогичен порошковому методу. Съемка дифрактограмм ведется на приборе ДРОН-3 м. Для линий (23$\bar{5}$4) *K* используется нефильтрованное медное излучение. Скорость счетчика 0,5 град. в минуту, скорость движения самописца 10 мм в минуту. Расстояние между максимумами (23$\bar{5}$4) должно быть не менее 20 мм. При дифрактометрическом варианте требуется больше материала (до 1 г), но резко повышается экспрессность анализа. Сопоставление простого измерения полуширины максимумов на дифрактограмме с результатами обработки методами гармонического анализа показало их сходимость и возможность получения надежных результатов простым измерением дифрактограмм.

Другие методы исследования кварца. Изучение включений в минералах, их химического и фазового состава, температур гомогенизации в настоящее время оформилось в самостоятельное направление — термобарогеохимию, методология которого изложена в работах Н.П. Ермакова, А.И. Захарченко, Ю.А. Долгова и других исследователей [16, 21, 26, 32, 33, 35, 36]. При изучении включений применяется большая группа физических, физико-химических и химических методов: масс-спектрометрия, лазерная раман-спектроскопия, хроматография и др.

Изучение газоотделения кварца в вакууме является важным для определения валового количества примесей (CO_2, N_2, Ar, H_2O, He, углеводороды); выделяющиеся газы разделяют путем фракционной конденсации и хроматографии [16, 29].

Для выяснения природы ЕТЛ, прямого определения концентраций изоморфных примесей Al, Fe, Mn, Ti, Ga, Ge и других элементов,

радиационных центров в кварце применяется метод ЭПР [30]. К сожалению, ЭПР-спектрометры имеются далеко не во всех лабораториях, и использование этого метода ограниченно.

В последние годы в практику минералогических исследований успешно внедряются электронно-микроскопические и микрозондовые методы исследования.

Методы изучения плотности кварца для выявления его типоморфных признаков, а также методы исследования деформационных структур и текстур приведены в упоминавшейся выше работе М.Я. Каца и И.М. Симановича.

Изучение структур перерождения кварца при пластических и хрупких деформациях рассмотрено в работах Н.В. Петровской [10, 40], А.Г. Жабина [17] и группы исследователей под руководством Г.Н. Вертушкова [18—20].

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Общие принципы типоморфического анализа. Полученные в результате лабораторных исследований данные должны обобщаться с позиций типоморфического анализа. На практике задачей типоморфического анализа является необходимость выявления типического и отличительного для групп индивидов одного минерального вида или его разновидности, которые отражают определенные условия минералообразования, характеризующиеся близкими пределами вариаций *PTX*-параметров минералообразующей среды. Поэтому поиски типических, т. е. типоморфных, признаков минералов, связанных с определенным характером самого процесса минералообразования, приводят к возможности получения критериев для выявления геологических ситуаций, типичных для определенных типов оруденения. Поскольку типоморфные признаки по сути своей есть признаки минералогенетические, то и сам процесс их познания методологически вытекает из минералогенетического анализа и основан на принципе минералогенетического резонанса, открытого А.Е. Ферсманом и сформулированного Н.П. Юшкиным.

В связи с тем, что минералогенетический резонанс проявлен во всем объеме состава и свойств каждого минерала и генетическая информация поступает в минерал на всем протяжении его существования, увеличивается неопределенность последней. Однако для решения прикладных задач, связанных с выявлением поисковых признаков, необходимо использование определенных критериев, характеризующих конкретный процесс минералообразования, приводящий, например, к формированию кварцевых жил или с золотом, или с оловом, или с вольфрамом.

Выделить из общего объема минералогенетической информации только ту, которая полезна для решения каждой конкретной задачи, можно, применяя типоморфический анализ, который, следовательно, является методологическим приемом для перехода к определенности.

Как известно из работ многих исследователей [46], типоморфический анализ предполагает учет явлений конвергенции, дивергенции и изовергенции, усиливающих неопределенность. Типоморфический анализ является в сущности заключительным этапом при изучении минералогии рудных месторождений и основой, на которой закладывается современная поисковая минералогия [11]. Только тогда, когда определены признаки минералов, являющиеся индикаторами рудного процесса, проявления последнего могут быть найдены при планомерных и целенаправленных поисковых работах.

Типоморфический анализ — метод сравнительно-статистический и логико-информационный. Это определяет необходимость иметь:

а) представительные выборки по каждому из параметров изучаемого минерального вида для возможности их обработки методами математической статистики и получения определенных параметров математического распределения в пределах данного множества;

б) серию выработок (множеств), характеризующих определенный в отношении рудной формации и рудоносности локатип в понимании Н.П. Юшкина.

Обработка аналитических данных. В общем случае путь для выявления типоморфных признаков один — сравнение изучаемого с известным. Известным может быть эталон или изученная ранее минералогенетическая система, либо одновременно изучаемые и сравниваемые системы. Используемые выборки могут быть однородными или неоднородными. Однородность выборок обеспечивается их подбором в процессе исследования или проверяется по критерию Д.А. Родионова.

Подбор материала в выборку основывается на принципах геологических различий: это образцы кварца, отобранные из определенной генерации или жилы, или определенного месторождения, или групп месторождений определенной рудной формации и т. п. Для выявления типоморфных признаков вероятной рудоносности кварцевых жил составляют выборки, включающие образцы рудного или безрудного кварца.

При прослеживании изменчивости состава и свойств в пространстве и определении типоморфных признаков для оценки уровня эрозионного среза или выклинивания оруденения по простиранию кварцевых жил или зон составляются выборки по сечениям или горизонтам их отработки или разведки. В необходимых случаях, в частности на месторождениях, где отчетливо проявлено зональное или ритмично направленное строение жильных тел, в пределах погоризонтальных выборок составляются подвыборки по признаку принадлежности того или иного образца к определенной из выделенных разновидностей кварца.

Самым эффективным из несложных сравнительно-статистических способов обработки данных является расчет средних арифметических ($\bar{x}$), дисперсий, средних квадратических отклонений (σ_n) и отношений величин. Методы математической статистики позволяют сравнивать выборки путем сопоставления этих величин (критерии Бартлета, Фишера и др.).

Для сравнения с эталоном, как показал Н.П. Юшкин, пригодны методы отличия по разности, которые позволяют определить меру удаленности (отличия) полученного признака от признака эталона. Он предложил определять общую меру отличия совокупности признаков эталона и исследованной выборки по формуле

$$I_n = \frac{1}{n} \Sigma \frac{A_i - a_i}{\sigma},$$

где n — число учтенных признаков, σ — среднее квадратическое отклонение, которое вычисляется для каждого из признаков эталона (локатипа).

В.И. Кузьмин, Н.В. Добровольская и Л.С. Солнцева предложили для определения рудноформационной принадлежности статистический способ по комплексу элементов-примесей с помощью известной формулы Байеса. Задача распознавания с использованием формулы Байеса сводится к вычислению условных апостериорных вероятностей и сравнению полученнных величин. Этот способ оценки вероятности принадлежности образца к тому или иному рудноформационному типу достаточно трудоемок и требует учета и кодирования всех известных рудноформационных типов (исполнения таблиц матриц и др.), но дает хорошие результаты, не требуя применения сложных ЭВМ.

Кроме рассмотренных выше методов обработки данных для выявления типоморфных признаков применяются регрессионный, корреляционный и факторный анализы с использованием современных ЭВМ. Для определения возможных отличий продуктивных и непродуктивных кварцев целесообразно рассчитывать коэффициенты корреляции между их золотоносностью и составом или свойствами. Следует широко применять наглядные логико-информационные методы, важнейшими из которых являются методы построения всевозможных графиков, отражающих зависимости полученных средних значений состава и свойств от глубины, от характера вмещающих пород, от околорудных изменений, от структурно-текстурных особенностей, от рудоносности, от состава минеральных парагенезисов и др. По возможности следует показывать распределение параметров в пространстве жил в изолиниях.

РАЦИОНАЛЬНОЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ

Комплекс методов изучения кварца с целью выявления его типоморфных признаков далеко не всегда следует применять в полном объеме. В зависимости от конкретных задач, степени изученности объектов и оснащенности лабораторий можно ограничиваться некоторыми из них.

Изучение тонких особенностей изоморфизма с применением метода ЭПР в комплексе с исследованием ЕТЛ и ИКС требуется для кварца новых объектов, где еще не выяснены типы ЭДЦ и неизвестны ионы-компенсаторы, входящие в структуру кварца при изомор-

физме и определяющие эти свойства. В этих случаях важно изучение форм воды комплексом методов фракционной конденсации и съемки ИК-спектров при температурах от −196 до +700 °С и исследование газово-жидких включений методом гомогенизации.

Определение параметров $\alpha - \beta$-переходов, СКС и микротвердости целесообразно выполнять при решении задач, связанных с выяснением принадлежности кварца к определенной рудной формации, при исследовании процессов последовательного минералообразования (выделение генераций) и при прослеживании изменчивости свойств с глубиной с тем, чтобы использовать эти данные в совокупности с другими при оценке уровня эрозионного среза.

Для выявления типоморфных признаков рудоносного и нерудоносного кварца целесообразно комплексировать методы изучения ЕТЛ, процессов метаморфического перерождения, пьезотекстур, электрических свойств и определение элементов-примесей (рудных и литофильных), особое внимание обращая на концентрации и распределение халькофильных и щелочных металлов.

Изучение жильного кварца в районах развития месторождений горного хрусталя и гранулированного кварца требует исследования структур и текстур, распределения углекислоты и воды (фракционная разгонка, вакуумная декрептометрия с хроматографическим анализом газов, ИК-спектрофотометрия), ЕТЛ, ИТЛ, плотности. Здесь необходим учет распределения минералов-примесей: слоистых силикатов, рутила, анатаза, ильменита и др.

При изучении кварца из районов, где развиты месторождения малоглубинных формаций, достаточным для отнесения к ним оказывается установление его структурно-текстурных особенностей в совокупности с признаками вещественного состава (включая минеральные парагенезисы).

В районах развития среднеглубинных месторождений наряду с макроскопическим изучением жильного кварца и исследованием рудных минералов, заключенных в нем, требуется изучение в шлифах процессов посткристаллизационного преобразования, особенно в результате пластических деформаций, а также исследование ЕТЛ, ИКС, ДП, СКС и обязательное определение элементов-примесей. Этих данных бывает достаточно для отнесения кварца к месторождению определенной рудной формации.

Если требуется определение уровня эрозионного среза, то дополнительно изучаются температуры гомогенизации и количество газовой фазы в газово-жидких включениях в сочетании с определением концентраций щелочных металлов, прослеживанием изменений интенсивностей ЕТЛ, концентраций Al-центров методом ЭПР (если возможно), определением концентраций воды и углекислоты по ИК-спектрам. Обязательным является изучение отношений величин концентраций ряда рудных элементов и щелочных металлов.

В целом комплекс методов в каждом конкретном случае подбирается, исходя из имеющегося положительного опыта, на основе пробных методических работ и может варьировать, особенно при выявлении новых месторождений.

Глава III. ТИПОМОРФНЫЕ ПРИЗНАКИ ЖИЛЬНОГО КВАРЦА

ФОРМА КРИСТАЛЛОВ КАК ТИПОМОРФНЫЙ ПРИЗНАК

Изменчивость форм индивидов. Решающее влияние на форму кристаллов кварца, как видно из обзора его изученности, оказывают режим pH и степень пересыщения растворов кремнеземом на фоне изменения температур.

Псевдогексагонально-призматические кристаллы дымчатого кварца указывают на относительно высокие температуры и пересыщение растворов кремнеземом в условиях относительно высокой щелочности при большой скорости роста в направлении граней призмы. Псевдогексагонально-призматическим длинностолбчатым габитусом характеризуются и кристаллы позднего бесцветного кварца, образующиеся на конечных стадиях кристаллизации при низких температурах в условиях относительного пересыщения растворов кремнеземом и относительно высокой их щелочности.

Длиннопризматические обелисковидные кристаллы тригонально-остроромбоэдрического габитуса образуются на промежуточных стадиях, характеризующихся умеренными значениями pH и пересыщений кремнеземом. Брусковидные, досчатые, уплощенные и расщепленные кристаллы не типичной для кварца формы получаются в результате регенерации обломков кристаллов на заключительных стадиях формирования пегматитов и хрусталеносных жил.

Формы головки и зональность. Формы головки зависят от положения оси *c* растущего кристалла относительно гравитационного поля Земли, что выражается в образовании псевдомоноклинных (моноклинно-диэдрических) форм кристаллов типа Дофинэ с резко гипертрофированной гранью ромбоэдра. Исследование зависимости этих форм от угла падения хрусталеносных жил позволило А.А. Кораго в 1968 г. рекомендовать способ определения углов падения жил по форме кристаллов кварца в свалах.

На основе изучения зональности кристаллов с применением комплексного метода — γ-декорирования и травления в HF полированных ориентированных пластин — Б.А. Колбин в 1976 г. предложил онтогенический метод прогноза качества кварцевого пьезооптического сырья (по 5—10 кристаллам с гнезда или месторождения). Прогноз основан на реконструкции последовательности изменений условий роста, которая отражается в плотности и полихромии радиационной окраски, полизональности кристалла, распространенности микродефектов, являющихся устойчивыми типоморфными признаками для совокупности кристаллов гнезда, месторождения или групп месторождений.

Скрученность кристаллов. Среди аномалий морфологии кристаллов кварца типоморфное значение приобретает их скрученность. Скрученные кристаллы, по Г.Г. Леммлейну, представляют собой сростки множества мелких субиндивидов, каждый из которых не-

сколько повернут относительно другого. В результате сложения поворотов в объеме кристалла возникают ломано-криволинейные поверхности граней и ребра. Почти все скрученные кристаллы найдены на месторождениях горного хрусталя в жилах альпийского типа: на Урале, в Карраре, в Швейцарских Альпах. В пегматитах Бразилии, Аппалачей, Волыни и Урала скрученные кристаллы не наблюдались.

По данным К. Фронделя, скрученность более типична для темнодымчатых кристаллов. Об этом же свидетельствуют материалы П.П. Юхтанова и В.П. Рузова, опубликованные в 1980 г. Они провели данные по 66 скрученным кристаллам, из которых 42 (65,6 %) были дымчатыми или дымчато-цитриновыми, остальные — цитриновыми. Показано, что скрученность кристаллов кварца увеличивается по мере сближения скоростей роста граней r, R, и m, происходящего при снижении пересыщения растворов кремнеземом. Коэффициент скрученности (отношение шага винта к средней толщине кристалла по оси L_2) увеличивается от дымчатых кристаллов к цитриновым (соответственно 267 и 3345) и указывает на уменьшение пересыщения раствора кремнеземом от начала к концу роста.

Штриховка на гранях. Обычная горизонтальная штриховка на гранях тригональной призмы $m(10\bar{1}0)$ есть результат изменчивости скорости роста параллельно и перпендикулярно к оси c или чередования граней острейших ромбоэдров и призмы [31]. По особенностям штриховки можно определять положение кристалла во время роста. На гранях, обращенных кверху, она выражена слабо. Грани, обращенные книзу, имеют четкую штриховку. В ряде случаев поперечная штриховка приводит к образованию обелисковидных кристаллов (музо-габитуса, по Гроссу Гвидо), диаметр которых в зоне призмы уменьшается к головке. По Гроссу Гвидо, это связано с увеличением частости поперечной штриховки по мере роста кристалла и обусловлено ритмичным слоеобразным отложением вещества. В целом ступенчатая непрерывная штриховка характеризует условия, благоприятные для образования кондиционных кристаллов кварца.

Таким образом, морфология, габитус кристаллов кварца, их зональность, скрученность, штриховка на гранях являются типоморфными признаками определенных концентраций и pH минералообразующих растворов, изменчивость которых, связанная со скоростью изменения температур и давлений, определяет скорость нарастания пирамид роста определенных граней кристаллов.

СТРУКТУРА И ТЕКСТУРА ЗЕРНИСТЫХ АГРЕГАТОВ КАК ТИПОМОРФНЫЙ ПРИЗНАК

Агрегаты жильного кварца глубинных и среднеглубинных месторождений

Структуры и текстуры кристаллизации. Для кварца месторождений глубинных и среднеглубинных формаций характерно резкое преобладание на начальных этапах кристаллизации субизо-

метрично-зернистых агрегатов, а на заключительных — шестоватых и друзовидно-шестоватых. Последние есть частный случай призматически-зернистых агрегатов с криволинейными поверхностями фронта центростремительного роста (относительно контактов жилы).

Первичные структуры обусловлены зарождением и ростом индивидов в течение раннего этапа жизни жилы. Индивиды ограничены индукционными гранями, размеры их варьируют в широких пределах. Г.Н. Вертушковым и другими исследователями [18—20] структуры с размерами индивидов 80—150 мм (стекловидный, реже замутненный кварц) отнесены к гигантозернистым, 20—100 мм, к крупнозернистым, менее 20 мм (стекловидный или молочно-белый кварц) — к средне-мелкозернистым.

На месторождениях вольфрамита грейзеновой формации в ассоциации с вольфрамитом обычен кварц крупнозернистый и гигантозернистый. Цвет его серый, светло-серый, молочно-белый с большим количеством газово-жидких включений, скопления которых образуют полосы и зоны, ориентированные в соответствии с зонами роста.

Наиболее распространены друзовидные, ноздреватые или массивные текстуры, которые обычно характеризуют продуктивность жилы. В продуктивных жилах шестоватые и гребенчатые агрегаты кварца встречаются значительно реже, чем в поздних, не содержащих промышленного вольфрамитового оруденения.

Строение кварц-вольфрамитовых жил достаточно подробно описано в работах О.Д. Левицкого, Е.Н. Доломановой, И.Ф. Григорьева, В.Ф. Барабанова, Г.Ф. Ивановой, А.В. Зильберминца и других исследователей. В призальбандовых частях кварц-вольфрамитовых жил обычен мелко-среднезернистый серый массивный кварц, к которому нередко приурочены мелкотаблитчатые агрегаты вольфрамита. В средних частях жил индивиды кварца увеличиваются в размерах, текстуры становятся друзовидными, вольфрамит образует гигантo- и крупнокристаллические, часто радиально-лучистые агрегаты. В центральных частях жил преобладает шестоватый и гребенчатый, как правило, безрудный кварц. Подобные же структуры и текстуры присущи кварцевым агрегатам кварц-касситеритовых жил в месторождениях грейзеновой силикатно-касситеритовой формации.

В месторождениях олова и вольфрама с наложенной сульфидной минерализацией (в кварц-вольфрамитовых жилах им сопутствует и поздний шеелит) кварц характеризуется уже деформационными текстурами, которые будут рассмотрены ниже.

Кварцевые жилы среднеглубинных и глубинных месторождений золото-кварцевой и сульфидно-золото-кварцевой формаций редко содержат кварц, не измененный последующими метаморфическими процессами. Обычно структуры и текстуры первичной кристаллизации встречаются только как реликты. Для них характерны крупная и средняя зернистость, слабая друзоватость, а для безрудных — гребенчатость.

Как правило, шестоватый и гребенчатый кварц безруден, а в

крупнозернистом кварце золото встречается в мелкодрузовых пустотах в виде мелких кристалликов или зерен размерами 0,1—1 мм в ассоциации с тетрадимитом, жозеитом, висмутином, галенитом, иногда с арсенопиритом. Подобные золотые руды развиты на многих рудных полях Забайкалья, Чукотки и других регионов.

Золото распределено в объеме жил крайне прихотливо, неравномерно в средних и нижних частях жил. В месторождениях глубинных формаций обычны друзовые полости, нередки хрусталеносные погреба.

Безрудные кварцевые жилы, локализованные в полях развития песчано-сланцевых или карбонатных пород, метаморфизм которых не превышает фации зеленых сланцев, и сложенные агрегатами со структурами кристаллизации, перспективны для обнаружения в них хрусталеносных гнезд и погребов.

Структуры и текстуры метаморфического перерождения. Перекристаллизация жильного кварца развита чрезвычайно широко на большинстве известных месторождений. На ранних стадиях пластического деформационного преобразования появляются различноориентированные трещинки и полоски Бема. Последние представляют собой серии пластинок, к границам которых приурочены мельчайшие жидкостные включения, проникающие при диффузии в полости, возникающие при взаимодействии дислокаций во время движения дислоцированных частей зерна по плоскости скольжения. Одновременно с образованием полосок Бема или несколько позже возникают деформации изгиба, степень интенсивности которых проявляется по различным разновидностям аномалий угасания. Н.В. Петровская [40] в связи с простым, полосчатым и пятнистым типами облачного угасания выделяет для кварца Енисейского кряжа соответственно простые, сложнополосчатые и пятнистые деформации изгиба.

Волнистое угасание в зависимости от характера перемещения его фронта подразделяется на три типа (по М.Я. Кацу и И.М. Симановичу): облачное волнистое угасание, отличающееся пятнистым неправильным движением фронта угасания при вращении столика микроскопа, при этом различие в ориентации угасающих участков кварцевого зерна невелико; фронтальное волнистое угасание, характеризующееся постепенным переходом фронта волнистого угасания при вращении столика микроскопа с одного края зерна на другой; прерывистое волнистое угасание, в котором одновременно проявляются черты волнистого и облачного. Появление облачного угасания свидетельствует о смене пластических деформаций хрупкими. В соответствии с современными представлениями волнистое угасание обусловлено системой единичных субпараллельных клиновидных блоков, переориентировавшихся в процессе пластической деформации.

К структурным особенностям кварца, которые возникают при пластической деформации, относятся также пластинкование, иррациональное двойникование, пояса деформации, смятие кварца и полосы деформации [18—20].

Наиболее ярким структурным проявлением пластической деформации в кварце является криволинейное пластикование и непрерывно-прерывистое разориентирование отдельных дислоцированных частей зерен.

Углубление процессов пластической деформации приводит к проявлению различных типов мозаичности, из которых наиболее характерны для кварца грануляционная и в меньшей мере изометрично-полигональная. Последняя обычно предшествует возникновению типично грануляционной и свидетельствует о начале формирования гранобластовой структуры. Остальные типы мозаичных структур указывают на более глубокие процессы перекристаллизации интенсивно деформированных зерен и агрегатов.

В жильном кварце среднеглубинных золоторудных месторождений процесс перерождения агрегатов и формирования грануляционных структур начинается с мозаичного распадения, на что указывала Н.В. Петровская при изучении жильного кварца месторождений Енисейского кряжа.

Этот процесс представляется как трехстадийный: разламывание крупных зерен на мозаичные блоки размером 2—5 мм и более; появление в зернах отдельных участков и зон мелкомозаичной структуры с блоками 0,1—0,5 мм; замещение всех зерен мелкозернистым агрегатом гранобластовой, роговиковой, сутурной структуры с размерами зерен 0,1—0,5 мм. Такой кварц имеет сахаровидный облик [40].

Г.Н. Вертушков и ряд других исследователей [18—20] показали, что структуры деформационного перерождения кварцевых жил восточного склона Урала обусловлены скольжением (пластинки деформации, бемовская штриховка), единичными и сопряженными изгибами со скольжением (волнистое угасание), фрагментацией за счет полос деформаций и их систем (блокование, мозаичное расчленение, начало грануляции).

Грануляция происходит во время или после пластических или хрупких деформаций. Хрупкие деформации появляются в результате быстрого нарастания деформирующих сил. Частным случаем их является ударный метаморфизм.

Молочно-белый кварц возникает из прозрачного при определяющей роли хрупких деформаций. При этом сначала образуются трещины скола и отрыва, затем происходят их залечивание и консервация вторичных газово-жидких включений. Возможность раскола обусловливается структурными дефектами: точечными (вакансии, межузельные атомы и центры окраски), линейными (дефект-каналы, дислокации), поверхностными (малоугловые и большеугловые границы зерен и двойников), дефектами упаковки. При раскалывании образуются различные ступени, около которых располагаются аморфные волокна и глобулярные частицы. В процессе хрупких деформаций зерна кварца измельчаются, часто перетираются до состояния милонитов. В результате деформируется кристаллическая решетка, происходит разрыв связей, освобождение воды и водных растворов из включений и дефект-каналов, одновременно увеличи-

вается поверхностная энергия, что приводит к необходимости перекристаллизации.

На ранних стадиях она происходит с поглощением энергии и уменьшением размеров зерен. Такая перекристаллизация, начинающаяся в предварительно пластически неравномерно деформированном, напряженном материале и заключающаяся в росте за счет деформированных кристаллов новых стабильных кристаллов с недеформированной решеткой [12] и происходящая в твердом состоянии, относится к рекристаллизации. В результате рекристаллизации динамические и тепловые напряжения снимаются в процессе образования зерен нового, более мелкозернистого агрегата. Син- и постдеформационная рекристаллизация по сути своей схожа с рекристаллизацией, связанной с термальным метаморфизмом. В результате рекристаллизации возникают и грануляционные структуры. К рекристаллизационной грануляции относится процесс образования мелкозернистого сливного, сахаровидного кварца, а также кварца с мозаичными, гранобластовыми и мостовыми структурами [40]. Классификация структур гранулированного кварца на примере Урала [18—20] приведена в табл. 6.

Формированию грануляционных структур сопутствует переотложение вещества. Если рекристаллизация идет в условиях продолжающихся динамических напряжений, образуются ориентированные текстуры [49], которые наследуются при последующей перекристаллизации с переотложением или при бластезе. В случае появления метаморфогенных растворов, недосыщенных по отношению к мелким зернам, рекристаллизация приводит к их укрупнению.

Приведенные данные о преобразованиях жильного и породообразующего кварца в результате деформаций свидетельствуют об их стадийности. Вначале происходят пластические деформации внутрикристаллического сдвига вдоль кристаллографических направлений $(10\bar{1}0)$, $(10\bar{1}1)$ и $(01\bar{1}1)$ и микрозон с повышенной плотностью дислокаций и дефектов. Это выражается в появлении различных модификаций волнистого угасания. Далее следует первоначальная динамическая регенерация, при которой в процессе внутрикристаллических трансляций могут происходить перемещения, кратные размерам элементарной ячейки, и часть дислокаций и дефектов вакансионного характера может исчезнуть. Это сопровождается миграцией дислокаций (газово-жидких включений, включений в каналах), что приводит к очищению кварца на субзерновом уровне. Следствием являются снижение плотности дислокаций, изменение дислокационной структуры, сетки дислокаций от прямоугольной к призматической и возникновение новых субзерен субструктуры. Углубление этого процесса приводит к возникновению структур блокования и мозаичного распада и появлению микроструктур, выражающемуся через блокование и мозаичное угасание. При этом начинает проявляться рекристаллизационная грануляция, сопровождающаяся не-

Таблица 6

Структуры гранулированного жильного кварца восточного склона Урала

Структура	Размер зерен, мм	Особенности структуры
Крупнозернистая	5—10^2	Крупногранулированный кварц. Гранулы имеют простые границы. В реликтах присутствуют стекловидный гигантозернистый кварц, часто блокованный
Среднезернистая	2—5	
Мелкозернистая	1—2	
Тонкозернистая	0,2—1	Микрогранулированный кварц. Границы сложные. В реликтах — стекловидный кварц, часто микроблокованный
Микрозернистая	0,05—0,2	
Мелкозернистая	0,5—0,2	Сахаровидный гранулированный кварц с мелкими гранулами. Границы часто простые. В реликтах — молочно-белый кварц фрагментарной структуры

прерывным вращением и миграцией границ зерен. В результате появления достаточного количества межзерновых растворов при относительной стабилизации динамометаморфизма вращение зерен уменьшается и наступает период перекристаллизации с укрупнением зерна до размеров, соответствующих ячейке Коксетера [13] при условии удовлетворения принципа Кюри для данных термодинамических параметров среды.

Перерождение агрегатов и рудоносность. О.А. Суставов в 1973 г., изучая жильный кварц Сарылахского золото-сурьмяного месторождения, установил, что критериями рудоносности кварца являются разнозернистость, волнистое, паркетное и мозаичное угасания, блокованность. Ранний безрудный кварц в жилах этого рудного поля обычно параллельно-шестоватый с признаками свободного роста. Для рудоносного кварца типичны также реликты полосчатых текстур и участки крупнозернистого строения, группы пылеватых частиц, указывающие на первично тонкозернистые, ритмично-полосчатые текстуры, характерные для близповерхностных золото-сурьмяных месторождений с антимонитом. Мозаичное волнистое угасание говорит о начале деформационного перерождения.

В процессе метаморфизма происходит перераспределение и переотложение рудных элементов, в частности золота, с укрупнением зерна и повышением качества руд. Именно с этим могут быть связаны процессы локального обогащения жильного материала золотом и сульфидами на многих рудных полях и образование рудных стол-

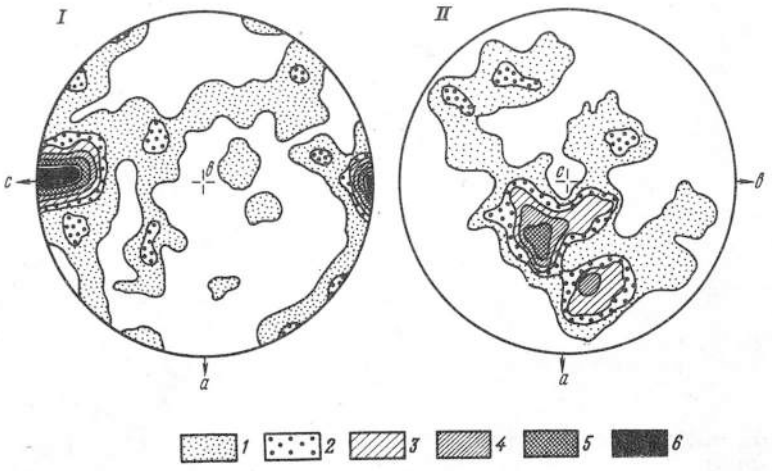


Рис. 3. Ориентировка оптических осей в жильном кварце разной золотоносности.

I – слабозолотоносный кварц, не претерпевший предрудной тектонической переработки (текстура "ориентировки роста") золото-жозеит-кварцевого парагенезиса (205 замеров); *II* – высокозолотоносный кварц, характеризующийся совмещением золото-висмутин-жозеит-кварцевого и золото-кварц-сульфидного парагенезисов (208 замеров); *а* — падение жилы, *в* — простирание жилы, *с* — нормаль к плоскости.

Плотность (в %): *1* — 1–2, *2* — 2–3, *3* — 3–4, *4* — 4–5, *5* — 5–6, *6* — 6–9

бов. В частности, на одном из среднеглубинных месторождений золота Забайкалья кварцевые жилы с повышенной золотоносностью обладают довольно четкими текстурами тектонической ориентировки [49]. Текстуры "ориентировки роста" не фиксируются вовсе, или в них проявлены значительные изменения. В участках жил с низкой золотоносностью резко преобладают текстуры ориентировки роста" (рис. 3). Из более чем двух десятков диаграмм, построенных для продуктивных кварцевых агрегатов золото-кварцевой и золото-сульфидно-кварцевой формаций, ни одна не имела четко выраженной текстуры "ориентировки роста". Поэтому можно полагать, что агрегаты кварца, характеризующиеся этими текстурами, не были подвержены воздействию полей напряжений, и в них не проявилась поздняя "предзолотая" трещиноватость, необходимая для наложения золота, связанного с поздними продуктивными минеральными ассоциациями.

В участках жил месторождения, расположенных на разных гипсометрических уровнях, тип и ориентировка текстур выдерживаются в пространстве всех жил, локализованных в пределах единого тектонического блока.

Безрудный кварц Коммунаровского рудного поля имеет крупноблоковое крупнозернистое строение, для него характерны вростки кальцита, типична перекрестная бемовская штриховка и лишь слабо намечается облачное угасание. Рудный кварц характеризуется почти полным отсутствием бемовской штриховки, но в нем интен-

сивно проявляется волнистое мозаичное угасание; структура его среднезернистая со следами начала мозаичного распадения, зерна частично развернуты. С кварцем ассоциируют альбит, гидромусковит, поздний переотложенный кальцит, золото.

Подобное распределение золота в зависимости от развития структур и текстур, обусловленных пластическими деформациями, характерно для абсолютного большинства среднеглубинных месторождений Забайкалья, Красноярского края, Урала.

О.И. Широкий в 1977 г. для оловорудных месторождений Приморья показал, что кварцу продуктивных зон кварц-касситеритовой стадии присущи массивные или друзоватые текстуры, и он лишь слабо катаклазирован. Интенсивнее катаклазированы агрегаты кварц-касситерит-сульфидного состава, а поздний гребенчатый и шестоватый кварц, как правило, не имеет следов пластических деформаций.

Изучение волнистого угасания ориентированных шлифов жильного кварца в связи с известным постоянством длин волн и амплитуд изгибов в каждой системе может дать надежную информацию о векторах деформаций в данном участке земной коры. Например, Ф.Ф. Борисков [19] по распределению интенсивности волнистого погасания и блокования разработал методику различия хрусталеносных и нехрусталеносных жил для одного из месторождений Восточно-Уральского поднятия.

Изучение структур агрегатов жильного кварца часто имеет решающее значение при оценке его качества как сырья для плавки и синтеза кристаллов.

Так, грануляционные структуры (0,2—1,0 мм) в совокупности с данными по потерям при прокаливании (менее 0,1 %), сумме примесей (не более $7{,}8 \cdot 10^{-3}$ %) и высокому светопропусканию (более 55 %) являются критериями оценки промышленной пригодности жильного кварца [19, 20]. Жилы гигантозернистого кварца с друзоватой текстурой и со слабо развитой грануляцией почти всегда самые молодые, и с ними чаще всего связаны месторождения горного хрусталя. В.Е. Верхотуров, изучавший кварцевые жилы Памира, показал, что гранулированный кварц характерен для метаморфизма в связи с мезозойской складчатостью, который проявлен в протерозойских гнейсах, кристаллических сланцах, кварцитах и мраморах, а гигантозернистый и среднезернистый кварц с первичными структурами зарождения и роста и без признаков грануляции характерен для зон палеогеновой активизации, и с жилами такого кварца связаны месторождения горного хрусталя.

По Ю.А. Соколову, безрудные кварцевые жилы являются продуктами регионального метаморфизма. Поэтому, например, жильный кварц определенных структур, локализованный в экзоконтакте Кочкарской группы гранитных массивов, характеризует и определенные фации метаморфизма: гигантозернистый стекловидный светло-дымчатый и гранулированный среднезернистый присущ альмандин-амфиболовой фации, а молочно-белый кварц гиганто-, крупно- и среднезернистый и микрогранулированный — фации зеленых сланцев.

Жильные существенно кварцевые агрегаты малоглубинных месторождений

Наиболее типичны для месторождений малоглубинных формаций, как это было показано Н.В. Петровской и другими исследователями [10], структуры и текстуры кварца Балейского рудного поля.

По времени образования и особенностям сложения и состава выделяются: массивные, пятнистые или брекчиевидные допродуктивные существенно кварцевые агрегаты; полосчатые, массивные, пластинчатые и гребенчатые продуктивные, содержащие золото в различных количествах; непродуктивные массивные и полосчато-массивные хальцедоновые кварцы. Брекчированность может проявляться также на всех этапах становления жил. Зернистые агрегаты характеризуются множеством последовательных генераций кварца. В общем случае устанавливается такая последовательность образования агрегатов различного сложения: 1) пятнистые, брекчиевидные или полосчатые допродуктивные; 2) полосчатые (фестончатые), ритмично-полосчатые продуктивные; 3) массивные с микросферолитовым или скелетным строением продуктивные; 4) макро- и микропластинчатые продуктивные; 5) шестоватые, макросферолитовые, гребенчатые продуктивные, но без существенных количеств золота; 6) массивные, пятнистые, грубополосчатые, кавернозные, друзовидно-гребенчатые послепродуктивные. Последовательно сменяющиеся разности 2, 3, 4 и 5 чаще всего образуют полосчатые ритмично сложенные агрегаты. Соотношение мощностей полос (ширины ритмов) различно в начале и в конце формирования агрегата. Ритмичность имеет периодический характер, и в более поздних периодах в случае отсутствия побочных явлений (внутриминерализационные подвижки, внутриагрегатные прожилки, мелкодрузовидные агрегаты, мельчайшие полости, трещины усыхания и т. д.) увеличиваются степень кристалличности и совершенства индивидов в каждом из текстурных видов агрегатов и общее количество пластинчатых и шестовато-гребенчатых агрегатов. Чередование текстур и структур наблюдается как в фестончатых тонкослоистых агрегатах, так и в последовательно сменяющихся пачках, сложенных фестончатыми, массивными, пластинчатыми и шестовато-гребенчатыми образованиями, в которых фестончатые и фестончато-массивные занимают вполне определенное место (рис. 4). Именно с массивных тонкозернистых и фестончатых агрегатов начинаются, как правило, ритмично сложенные постройки. При этом их характернейшей чертой является определенная последовательность расположения от тонкозернистых к мелко-, средне- или крупнозернистым, далее к пластинчатым, затем шестоватым. Следует подчеркнуть, что тонкозернистые агрегаты, в свою очередь, состоят из ритмично построенных микросфалеритов, в которых чередуются слойки кварца и слоистых силикатов (рис. 5).

Описанная последовательность универсальна и присуща в равной

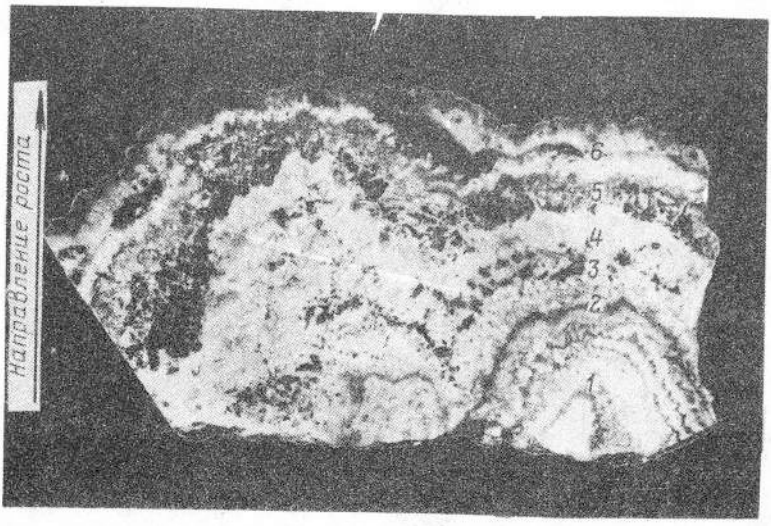


Рис. 4. Типичная последовательность образования жильного кварца различной текстуры (Балейское рудное поле). 1/4 нат. вел.

1 — ритмично-полосчато-фестончатый; *2* — массивный; *3* — макро- и микропластинчатый; *4* — массивный макросферолитовый, микропластинчатый, переходящий в тонкошестоватый; *5* — пластинчато-гребенчатый, каркасный, шестоватый; *6* — шестоватый, мелкогребенчатый

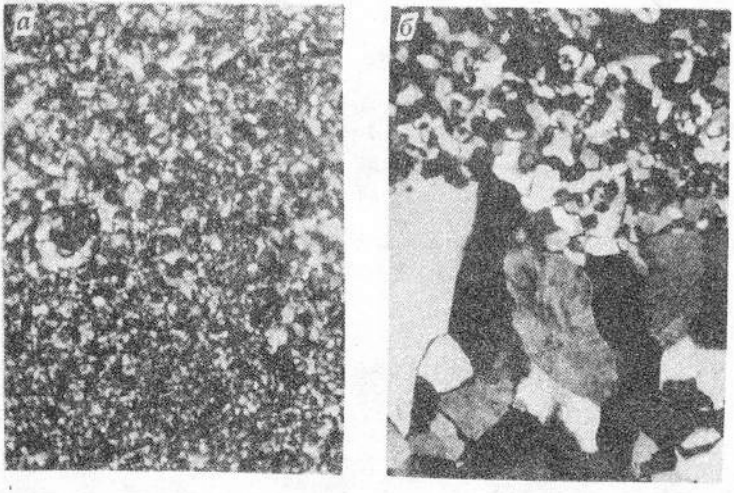


Рис. 5. Микроглобулярно-сферолитовое строение зерен тонкозернистого кварца.

а — увеличение размеров зерен в направлении от основания слоя к его верхней части. Увел. 72^{x}; *б* — микроглобулярно-сферолитовый тонкозернистый кварц, наслоенный на сферолито-микрошестоватый. Центральные части глобул и сферолитов обогащены монтмориллонитом.
Балейское рудное поле. Увел. 160^{x}, николи +.

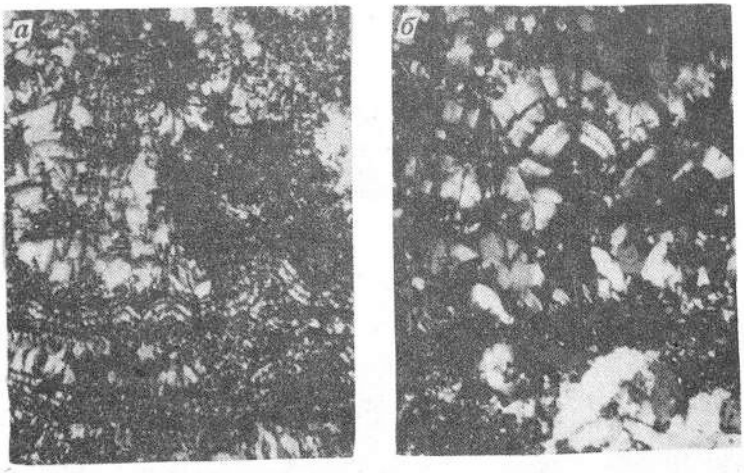


Рис. 6. Ритмично-полосчатое строение слоя толщиной около 1,5 мм.

а — чередование микрошестоватого кварца и микрозернистых кварц-монтмориллонитовых агрегатов в тонкополосчатом фестончатом слойке. Увел. 72^{x}, николи +; *б* — почковидный фрагмент микрослоистого существенно кварцевого агрегата; чередование слоев микрошестоватого кварца и микрозернистого агрегата кварца и монтмориллонита. Увел. 240^{x}, николи +

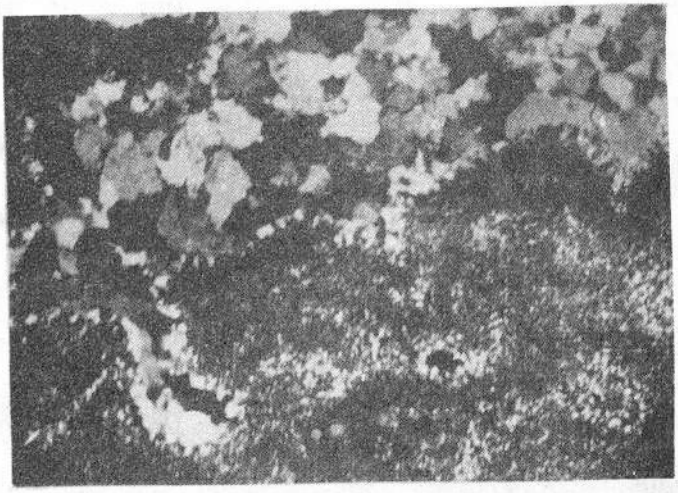


Рис. 7. Нарастание тонкого слоя микрозернистого кварца, сменяющегося тонкозернистым массивным, на почковидных скоплениях монтмориллонит-гидрослюдисто-кварцевого состава в основании ритма.
Балейское рудное поле. Увел. 160^{x}, николи +

мере и отдельным слойкам в фестончато-слоистых агрегатах, и пачкам слоистых агрегатов, и крупно- и грубозернистым постройкам, представляющим собой законченный ритм, слагающий нередко одну из половин симметричной жилы (рис. 6—8).

Как правило, наиболее мощные и правильно построенные периодические циклы наблюдаются у лежачих боков жил. Соотношение мощностей агрегатов, характеризующихся определенным типом структур и текстур, в апофизах и ответвлениях зависит от того, на какой стадии кристаллизации происходило внедрение флюида в боковую трещину: если на ранних стадиях, то в апофизах проявляется вся гамма текстур и структур с преобладанием фестончатых, если на промежуточных, то преобладают массивные и мелкопластинчатые, если на заключительных, то доминируют массивно-шестоватые, крупнопластинчатые или друзовидные.

Достаточно отчетливо изменение минеральных парагенезисов — от гидрослюдисто-монтмориллонит-каолинит-кварцевых или адуляр-кварцевых и хлорит-кварцевых в начале ритмов и периодов к мономинеральным кварцевым агрегатам в их конце.

Золото, серебро, сульфиды и сульфосоли образуют ритмично повторяющиеся скопления. Максимальные их концентрации отмечаются на границах перехода от существенно кварцевых частей к частям, сложенным алюмосиликатно-кварцевыми агрегатами.

Указанные закономерности являются общими, но они могут проявляться в иной последовательности в зависимости от изменения конкретных условий формирования месторождений.

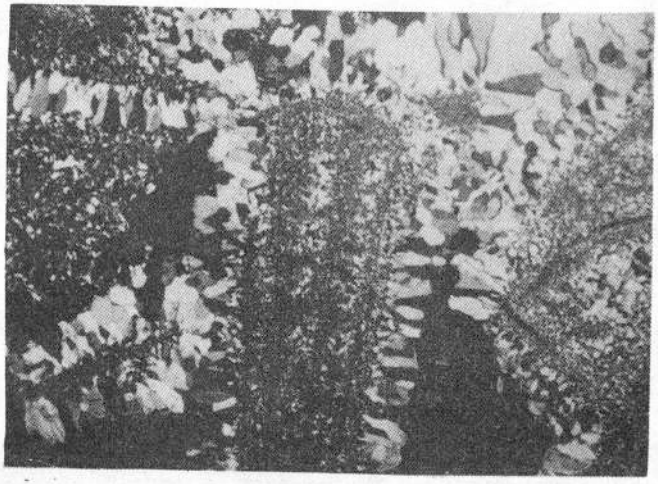


Рис. 8. Фрагмент пластинчато-каркасного агрегата кварца.

Отдельные пластинки состоят из тонкозернистого стержня монтмориллонит-кварцевого состава с мелкогребенчатой внешней коркой. В центре — многослойная пластина, сложенная серией единичных пластин, обросшая коркой коротко-шестоватых кристаллов кварца

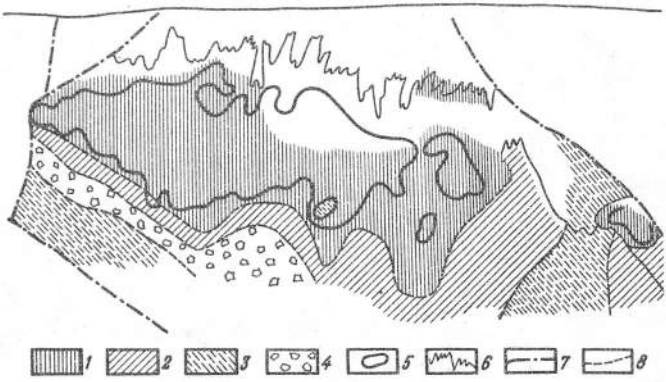


Рис. 9. Распределение преобладающих текстур жильного вещества в плоскости жилы № 1 Балейского рудного поля. По В.Г. Хомичу и Г.А. Питаевой с дополнениями автора.

Текстуры: *1* — тонкополосчатые, *2* — массивные и грубополосчатые, *3* — массивные, тонкошестоватые и шестовато-мелкогребенчатые, крутификационно-шестоватые и радиально-шестоватые, *4* — брекчиевые, *5* — контур зоны рудных столбов; *6* — контур нижней и верхней переходных зон; *7* — разломы, *8* — границы развития структур

Вариации количественных соотношений текстур в пространстве можно показать на примере Балейского рудного поля в последовательности образования (рис. 9), в связи с околорудными изменениями и рудоносностью (рис. 10) и в зависимости от вмещающих пород (рис. 11).

В общем случае на верхних и средних горизонтах среди продуктивных кварцев преобладают полосчатые, тонкополосчатые, фестончатые агрегаты. Массивные и в меньшей мере пластинчатые менее развиты. Часто это мелкопластинчатые агрегаты с небольшими пустотами, выполненными реликтами адуляра, замещенного гидрослюдой или монтмориллонитом, а также содержащими мелкие (не более 1—1,5 мм) кристаллики кварца. С глубиной увеличивается количество массивных и пластинчатых текстур, а также относительно крупных друзовых полостей, в которых обнаруживаются щетки кристаллов кварца и карбонаты. Пластинчатый кварц здесь чаще представлен крупнопластинчатыми или каркасными постройками, а в массивном кварце обильны пустоты с мелкими кристаллами этого минерала. Полосчатые агрегаты развиты менее; полосы не столь контрастны, содержат меньше слоистых силикатов и состоят из кварца гранобластовой, реже типично сферолитовой структуры. Следует отметить, что в приповерхностных участках наблюдаются также отдельные маломощные жилы пластинчатого кварца, в которых роль фестончатых агрегатов кварц-гидрослюдистого состава выполняют тонкорадиально-лучистые полосчатые фестончатые агрегаты пирита, локализованные в приконтактовых частях этих жил.

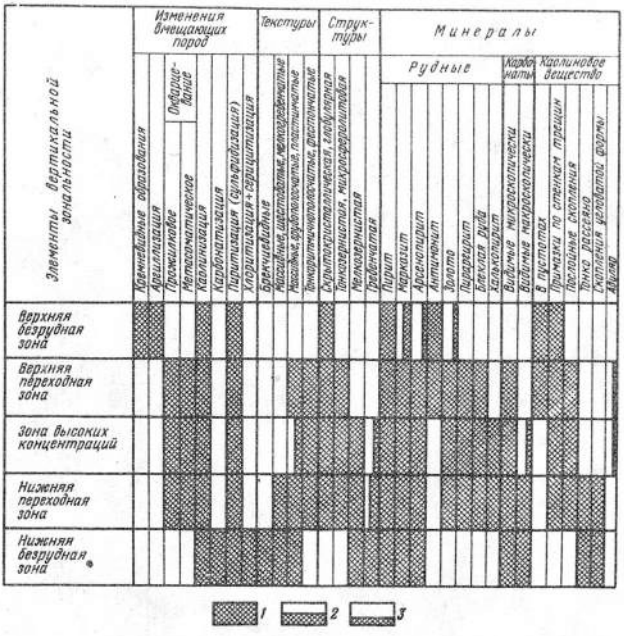


Рис. 10. Распределение структурно-текстурных разностей кварцевых агрегатов, минералов и околорудноизмененных пород в рудной зоне Балейского поля. По материалам В.Г. Хомича и Г.А. Питаевой с дополнениями автора.

1 — широко распространенные или обычные; *2* — мало распространенные; *3* — редкие или необычные для определенных условий.

Описанные структурно-текстурные разности кварца Балейского рудного поля составляют единый ряд последовательно образующихся существенно кварцевых агрегатов. Главную массу составляют те, в которых золото и сопутствующие ему элементы отлагались в процессе их формирования в моменты относительно резких изменений pH, давлений и относительных концентраций компонентов, входивших в состав рудообразующего флюида. До изучения физических свойств кварцевых агрегатов главным типоморфным признаком их для месторождений малоглубинной формации был внешний облик. К продуктивным относились полосчатые и каркасные, реже гребенчатые. Гребенчатый и пластинчатый кварц, с котором ассоциирует крупное "позднее" золото, получил название второй продуктивной ассоциации [10] из-за того, что нередко наблюдались пересечения жил ранних продуктивных и непродуктивных ассоциаций "поздними" жилами, сложенными массивным, полосчатым, пластинчатым или гребенчатым кварцем. Нам представляется отнесение последних в отдельную стадию недостаточно обоснованным. "Поздние" жилы и прожилки, секущие по трещинам усыхания и контракции ранние генерации кварца, представляют собой, по сути дела,

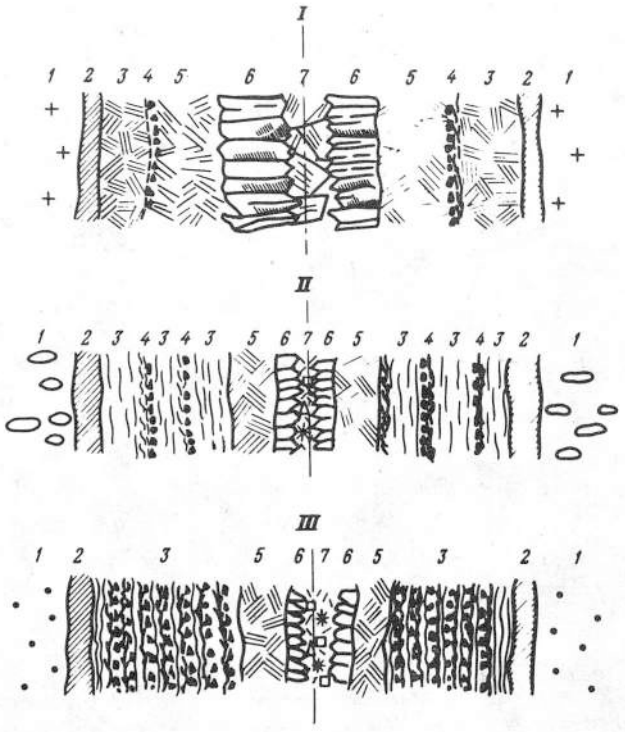


Рис. 11. Типоморфные текстуры кварцевых жил Балейского рудного поля среди гранитоидов (*I*), конгломератов (*II*), песчаников (*III*). По В.Г. Хомичу, Г.А. Питаевой с дополнениями автора.

1 — вмещающие породы; *2* — зона серого, темно-серого, черного массивного микрозернистого допродуктивного кварца; *3* (*I*) — зоны мелкопластинчатого кварца; *3* (*II*) — зоны неяснополосчатого кварца; *3* (*III*) — зоны тонкоритмично-полосчатого продуктивного кварца, перемежывающегося с массивным, на контактах ритмов — сульфиды, сульфосоли, золото; *4* (*I–III*) — зоны скопления каолинита и рудных минералов; *5* — зона крупнопластинчатого кварца; *6* — зона шестоватого кварца; *7* (*I*) — зона кальцита (ромбоэдрического габитуса); *7* (*II–III*) — зона серого и темно-серого тонкозернистого массивного, массивно-пластинчатого послепродуктивного кварца с пиритом и антимонитом

продукт тех же флюидов, из которых формировалась и основная масса продуктивного кварца, а структура, состав, золотоносность и свойства их зависят от того, на какой стадии кристаллизации первичного флюида они были от него отторгнуты и в каких условиях кристаллизовались. Как правило, секущие жилы сложены более крупнозернистыми агрегатами. Крупное золото в пустотах и трещинах могло расти в спокойных условиях из остаточных или перемещеных растворов.

Появление сложных текстур жильного кварца, включающих взаи-

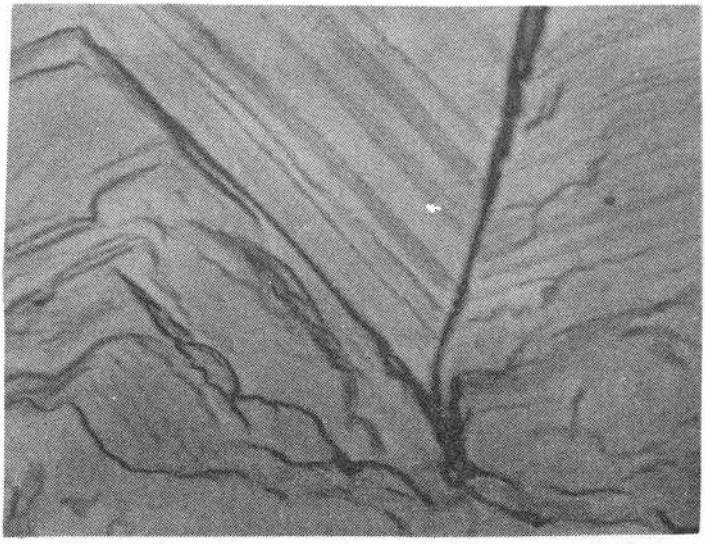


Рис. 12. Ступенчатое нарастание слоев по ромбоэдру в микрокристалле кварца. На сколе отражено ритмичное распределение зон с различной прочностью. Увел. 44000^{x}

мопересечения агрегатов с близкими свойствами и составом, обусловлено особенностями условий его кристаллизации (скорость охлаждения и кристаллизации, процессы взламывания, особенности распределения примесей и т. д.), и поэтому оно также должно быть одним из типоморфных признаков малоглубинной формации.

В изменении структурно-текстурного облика кварцевых агрегатов намечаются закономерности, отражающие уменьшение скорости кристаллизации вещества с глубиной. В целом проявляется вертикальная макрозональность в распределении агрегатов определенных структур и текстур, которая отражается и в периодической направленности горизонтальной микрозональности (от начала к концу формирования жилы) на различных уровнях организации жильного вещества — от мельчайших кристалликов величиной меньше 0,002 мм (рис. 12) до микроритма и ритмично сложенной жилы. Подобные структуры и текстуры кварцевых агрегатов и их распределение в пространстве наблюдались и на других рудных полях.

На одном из них (Северо-Восток СССР) в жиле Главной, локализованной в дацитах и липаритах (северо-восточная часть) и в автомагматических брекчиях среднего состава (юго-западная часть), агрегаты кварца различных структур и текстур распределены симметрично-зонально. Главными жильными парагенезисами являются: адуляр-кварцевые, каолинит (гидрослюдисто)-адуляр-кварцевые, кальцит-адуляр-кварцевые и хлорит-кальцит-кварцевые. Средин-

ную часть жилы, составляющую около половины ее объема, слагают адуляр-кварцевые массы. В принципе область распространения адуляр-кварцевого парагенезиса совпадает с контурами распределения золотого оруденения. Каолинит (гидрослюдисто)-адуляр-кварцевый парагенезис слагает фланговые части жилы. В подрудной части зоны существенно золотого оруденения и контурах существенно серебряного ширина полосы развития этого парагенезиса в 2—3 раза больше. В юго-западной части он имеет незначительное распространение.

В жиле Главной наиболее развиты ритмично-полосчатые, тонкофестончато-полосчатые или грубополосчатые текстуры. На контакте жилы в лежачем боку тонкая (1,5 мм) полоса тонкозернистого или тонкошестоватого кварца, на которую нарастает слой мощностью 0,6—1,7 см, состоящий в основном из светло-кремового адуляра и кварца. Обособления адуляра идиоморфны. Далее следует слой массивного мелко- до тонкозернистого кварца, который сменяется тончайшим слоем существенно адулярового состава. Затем вновь выделяется слой тонкошестоватого кварца с гидрослюдой и адуляром на границах удлиненных индивидов кварца. Следующий ритм снова начинается с обильного выделения адуляра и завершается тонкополосчатым фестончатым шестоватым кварцем. Сменяющий его ритм также начинается слоем адуляра и завершается массивным, а затем тонкошестоватым кварцем. На этом образование адуляр-кварцевых ритмов заканчивается. Более поздние ритмы сложены существенно кварцевыми слоями, в основании которых отмечаются слойки адуляр-гидрослюдистого или адуляр-каолинитового состава. В этих четырех слоях в направлении роста индивидов происходит постепенное (но периодическое) уменьшение количества глиноземистых компонентов в кварцевой матрице и увеличение размеров индивидов кварца, их прозрачности и совершенства. Завершается кристаллизация со стороны лежачего бока крупношестоватым или мелкогребенчатым серым или аметистовым кварцем. Часто по возникающим трещинам последние генерации кварца формируются в тонких прожилках. В процессе кристаллизации отдельные части уже сформированных ранних генераций раскалывались и обрастали кварцем последующих генераций. Со стороны висячего бока мощность ритмов в жиле резко уменьшается. Поэтому в большинстве случаев она имеет симметрично-асимметричное строение.

Описанная последовательность в образовании отдельных слоев и ритмов (структурно-текстурных разностей агрегатов) в пределах всей жилы Главной в принципе одинакова. Но в ряде случаев, как и на других рудных полях, из общей системы слоев, агрегатов и парагенезисов некоторые могут выпадать в зависимости от конкретных условий, времени раскрывания и существования рудовмещающих трещин, их подновления.

Изучение распределения массивно-полосчатых, массивных, пластинчатых, шестоватых и гребенчатых агрегатов кварца на фоне полосчатых, которые распространены практически по всему объему жилы (рис. 13), показало, что границы распространения структурно-тек-

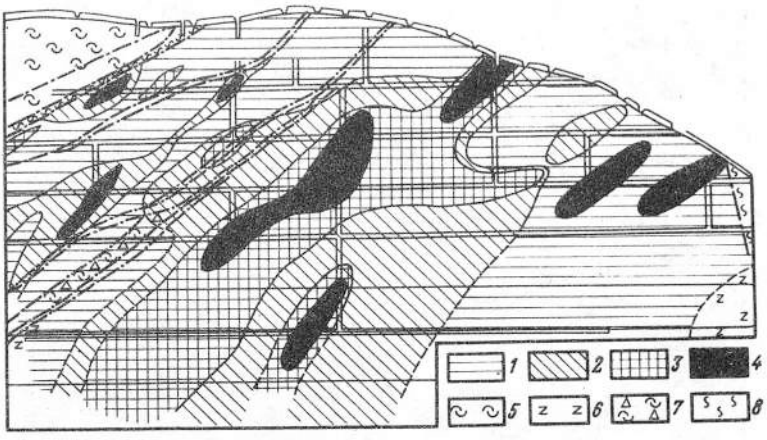


Рис. 13. Распределение в жиле Главной агрегатов жильного кварца различных структурно-текстурных разностей.

1 — полосчатый; *2* — полосчато-массивный и массивный; *3* — пластинчатый (''рубленый'') шестоватый и гребенчатый; *4* — аметистовидная разновидность шестовато-гребенчатого; *5* — кристаллокластические игнимбриты и туфобрекчии андезито-дацитового состава; *6* — дациты; *7* — кристаллокластические игнимбриты и туфобрекчии дацитового состава; *8* — милониты и тектонические брекчии

стурных разностей кварцевых агрегатов соответствуют границам распространения золотого оруденения; наиболее полные комплексы структурно-текстурных разностей соответствуют обогащенным золотом частям жилы; наблюдается симметричная зональность — от существенно полосчатых на флангах к полному комплексу структурно-текстурных разностей в срединной части и в отдельных локальных раздувах; с глубиной увеличивается доля массивных и шестовато-гребенчатых агрегатов. В связи с тем, что полосчатые агрегаты являются ранними, отмеченные закономерности свидетельствуют о вероятной центростремительной кристаллизации: от флангов к центру и сверху вниз. Остаточные растворы дольше сохранялись в срединной части, где наблюдаются мощности жилы.

В целом комплекс структурно-текстурных разностей жильного кварца, развитого на месторождении, последовательность их образования, ритмично-периодическое распределение в жиле в направлении от контактов к середине, общие тенденции их изменчивости с глубиной, состав жильных минеральных парагенезисов близки развитым на Балейском и других рудных полях, что позволяет рассмотренные особенности структур и текстур существенно кварцевых агрегатов считать типоморфными для месторождений малоглубинной золото-серебряной формации.

В существенно кварцевых жилах месторождений, переходных от типичных малоглубинных к среднеглубинным, возрастает распространенность массивных и друзовидных агрегатов, больше ста-

новится шестоватых построек, чаще встречаются полости с кристаллами, но во всех случаях сохраняется ритмичная слоистость в строении жил, характеризующихся тем, что в начальные стадии их формирования образуются брекчиевые и массивно-брекчиевые агрегаты, обогащенные сульфидами, а последующие генерации сложены преимущественно кварц-адуляровыми слоями. Количество адуляра ритмично уменьшается в агрегатах, слагающих поздние генерации жильного выполнения, а сами агрегаты становятся шестоватыми, часто друзовидными.

СОСТАВ И ПРИМЕСИ КАК ТИПОМОРФНЫЙ ПРИЗНАК

Алюминий и титан. Кварц из безрудных жил западной части Борщовочного поднятия и других объектов, по данным А.Г. Малышева, практически не содержит структурного алюминия, тогда как кварц продуктивных ассоциаций с касситеритом, золотом, вольфрамитом резко обогащен алюминием (табл. 7).

Содержание алюминия уменьшается в ряду от грейзенов до золоторудных среднеглубинных месторождений. Аномально высокие концентрации глинозема в тонкозернистых существенно кварцевых агрегатах из жил месторождений малоглубинной золото-серебряной формации объясняются примесью тонкодисперсных слоистых силикатов, но концентрации структурного алюминия в них составляют 0,12—0,8 %.

Получение монофракций кварца из его мелко- и тонкодисперсных агрегатов достаточно сложно и дорого. Для решения практических задач целесообразно пользоваться легкой фракцией материала из участков жил, визуально не содержащих полевых шпатов и слоистых силикатов. Обработанные данные анализа более 1180 приготовленных таким способом проб жильного кварца из 28 месторождений показали (рис. 14), что в ряду золоторудных формаций наблюдается уменьшение концентраций алюминия от глубинных золото-кварцевых к среднеглубинных золото-сульфидно-кварцевым. Максималь-

Таблица 7

Концентрация глинозема в монофракциях жильного кварца по данным химического анализа

Рудная формация	n	$\bar{x}$	σ_n
Грейзеновая кварц-вольфрамитовая	8	0,203	0,096
Глубинная золото-кварцевая	14	0,069	0,081
Среднеглубинная золото-кварцевая убогосульфидная	7	0,031	0,032
Малоглубинная золото-серебряная	17	1,33*	0,45

*Легкая фракция, на 99—99,5 % состоящая из чистого кварца.

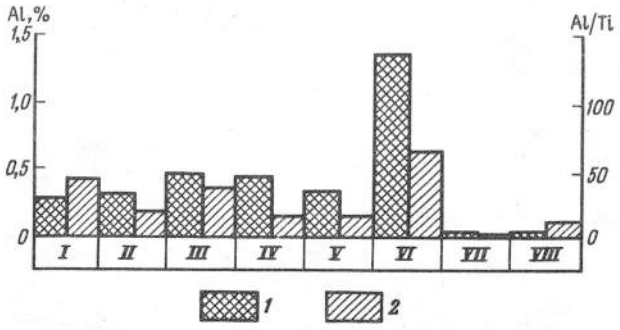


Рис. 14. Содержание алюминия и отношение концентраций алюминия и титана в кварце месторождений восьми генетических типов.

I — пегматиты (28 проб); *II* — грейзеновая кварц-вольфрамитовая формация (49 проб); гидротермальные месторождения: *III* — глубинные золото-кварцевые (95 проб), *IV* — золото-кварцевые, переходные к глубинным (66 проб), *V* — среднеглубинные золото-кварцевые убогосульфидные (258 проб), *VI* — малоглубинные золото-серебряные (739 проб); хрусталеносные месторождения: *VII* — нехрусталеносные жилы (15 проб), *VIII* — хрусталеносные жилы (15 проб). *1* — Al; *2* — Al/Ti.

ные концентрации алюминия обнаружены также в кварце месторождений малоглубинной формации. Самые низкие содержания алюминия присущи кварцу хрусталеносных жил.

В работе Е.И. Доломановой, Л.В. Бершова и М.С. Гасоян [15] по данным ЭПР показано, что распределение алюминия в кварце в ряду рудных формаций оловорудных месторождений вполне закономерно. Нами наблюдалось ритмичное уменьшение содержания алюминия в кварце в ряду формаций от гранитов к наиболее поздним касситерит-хлорит-сульфидным жилам сульфидно-касситеритовой формации и в границах самих формаций — от биотитовых гранитов к альбитизированным и амазонитизированным, от сотового кварца пегматитов к дымчатому, от раннего кварца из касситерит-полевошпатово-кварцевых жил силикатно-касситеритовой формации к позднему гребенчатому кварцу этой же формации и т. д. (рис. 15).

По данным Г.Е. Юшковой, Н.Д. Миловидова и других исследователей концентрации Al-центров в кварце грейзеновых месторождений вольфрама и бериллия уменьшаются от внутриинтрузивных месторождений (16,3 усл. ед) к надинтрузивным, связанным с гранитами литий-фтористого типа (3,5—9,4 усл. ед.), и достигают минимума во внеинтрузивных месторождениях (1,6—3,2 усл. ед.). При этом содержания Al-центров и лития коррелируют. Концентрации Al-центров, по Л.В. Бершову, М.Д. Крыловой и А.В. Сперанскому, увеличиваются в кварце с нарастанием метаморфизма от зеленосланцевой фации до гранулитовой в 30 раз.

В кварце месторождения вольфрама Кти-Теберда А.В. Сперанский, А.В. Игнатов и Л.В. Бершов методом ЭПР установили увели-

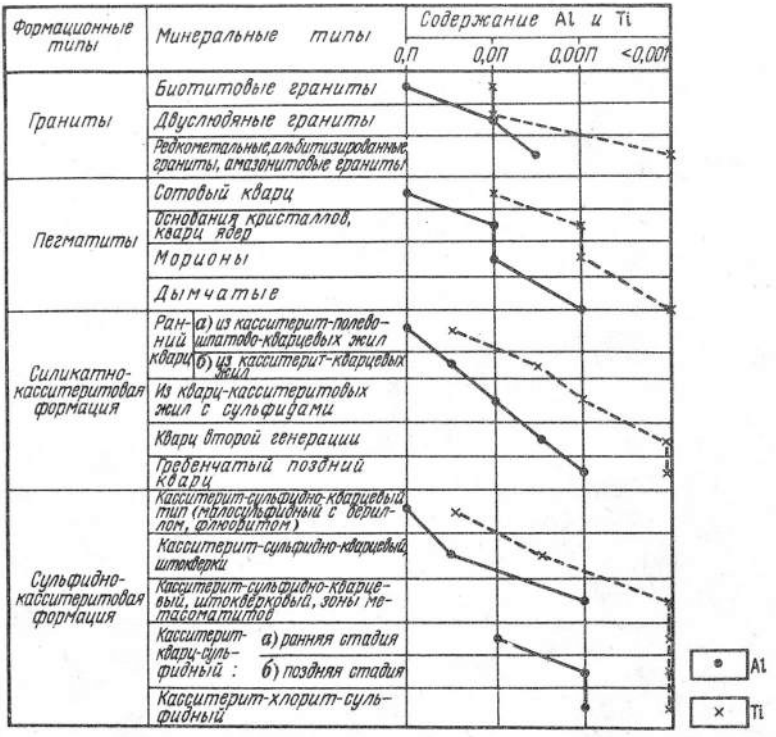


Рис. 15. Направленная ритмичная изменчивость содержаний изоморфных алюминия и титана в кварце гранитов, пегматитов и оловоносных жил

чение с глубиной концентрации алюминия. Анологичные данные получены нами в результате изучения серии образцов одного из среднеглубинных золото-кварцевых месторождений Забайкалья (измерение концентраций AlO_4-центров любезно выполнено М.Я. Щербаковой на образцах В.Е. Тупякова): на интервале глубин 150 м концентрация AlO_4-центров возросла втрое.

Вариации содержаний титана в кварце различных формаций менее контрастны, но соотношение их с содержаниями алюминия может быть типоморфным признаком. В частности (см. рис. 14), по отношению величин средних содержаний алюминия и титана четко различаются кварц пегматитов и вольфрамоносных жил в грейзенах, глубинных и среднеглубинных золоторудных месторождений, хрусталеносных и нехрусталеносных жил.

По данным ЭПР концентрации титана изменяются в формационных рядах аналогично алюминию (см. рис. 15). В кварце поздних генераций оловорудных месторождений силикатно-касситеритовой (кварц второй генерации) и касситерит-сульфидно-кварцевой подформаций концентрации титана находятся на пределе чувствительности метода (< 0,001 %). Концентрации ЭДЦ в кварце, связанные с

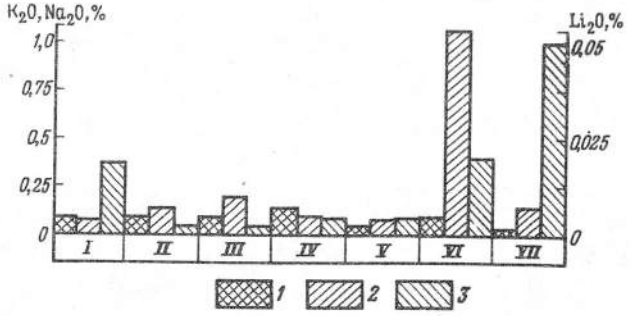


Рис. 16. Содержание щелочей в кварце месторождений семи различных рудных формаций.

I — пегматиты (7 проб); *II* — грейзеновая кварц-вольфрамитовая формация (17 проб); гидротермальные месторождения: *III* — золото-сульфидно-кварцевые глубинные (23 пробы), *IV* — золото-кварцевые глубинные (104 пробы), *V* — среднеглубинные золото-кварцевые убогосульфидные (120 проб), *VI* — малоглубинные золото-серебряные (1526 пробы), *VII* — среднеглубинные, халцедоновидный кварц (24 пробы). *1* — Na_2O; *2* — K_2O; *3* — Li_2O

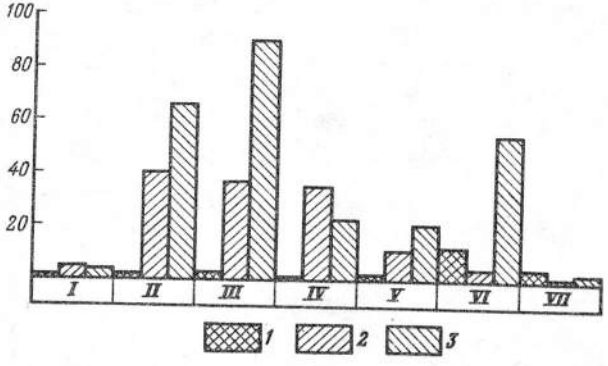


Рис. 17 Величины отношений концентраций щелочей в кварце месторождений семи различных рудных формаций.

1 — K_2O/Na_2O; 2 — Na_2O/Li_2O; *3* — K_2O/Li_2O. Остальные обозначения те же, что на рис. 16

примесью титана, как выявили в 1975 г. Л.В. Бершов и другие исследователи, могут быть типоморфными признаками фаций глубинности и метаморфизма, так как фиксируются в кварце амфиболитовой и более высоких фаций. Возрастанию метаморфизма соответствует увеличение концентраций титана.

Щелочные металлы. Обычными примесями в кварце являются щелочные металлы. Сравнительные данные их валовых содержаний приведены на рис. 16. На общем фоне по минимальным концентра-

циям натрия выделяется кварц среднеглубинных золоторудных месторождений и поздний халцедоновидный непродуктивный. По максимуму концентраций калия обособляется кварц малоглубинных золото-серебряных месторождений, а по минимуму — кварц пегматитов. По концентрациям лития выделяется кварц пегматитов и малоглубинных золото-серебряных месторождений.

По натрий-литиевому отношению (рис. 17) обособляются глубинные месторождения вольфрама и золота от других формационных типов золоторудных месторождений. Наблюдается отчетливая тенденция уменьшения этой величины от грейзеновых глубинных месторождений к малоглубинным более чем в 10 раз: происходит относительное накопление лития в кварце с уменьшением глубины его образования.

Как считают Е.И. Доломанова, Л.В. Бершов и М.С. Гасоян, в кварце оловоносных гранитоидов основным компенсатором зарядов при изоморфизме является натрий, в кварце из пегматитов появляется литий, а в образцах, характеризующих конечные стадии кристаллизации, присутствует водород (табл. 8).

Из рассмотренных данных следует, что существует тенденция смены в кварце ионов-компенсаторов от натрия в ранних генерациях до лития и водорода в промежуточных и поздних в следующем порядке: Na^+, Li^+, H^+. Количество примесей ионов щелочных металлов уменьшается от высоко- к низкотемпературному кварцу.

Зависимость концентраций петрогенных элементов от глубины. В жилах среднеглубинных рудных месторождений кон-

Таблица 8

Ионы-компенсаторы в кварцах различного генезиса

Формационная принадлежность кварца	Ионы-компенсаторы	Примечания
Оловоносные граниты	Na^+	
Пегматиты (ядро)	Na^+, Li^+	Роль Li^+ возрастает к концу процесса
Пегматиты (гидротермальный кварц)	Na^+, Li^+, H^+	Роль Li^+ и H^+ возрастает к концу процесса
Касситерит-силикатная формация	Na^+, Li^+, H^+	H^+ преобладает, в конце процесса — H^+, Li^+
Сульфидно-касситеритовая формация (ранние стадии):	Na^+	В морионе
а) кварц-сульфидно-касситеритовый тип:		
Шерловая Гора	Na^+, Li^+, H^+ } H^+, Li^+	В дымчатом кварце
Тарбальджей	H^+	В сером кварце
б) касситерит-хлорит-сульфидный тип:		
Хапчеранга	H^+, Li^+	
Южный Харатуй	H^+	В аметистах только H^+

центрации примесей алюминия возрастают с глубиной, а в малоглубинных — уменьшаются их валовые количества (рис. 18), но увеличивается доля структурных примесей.

В кварце глубинных и малоглубинных месторождений концентрации калия с глубиной уменьшаются (см. рис. 18), а среднеглубинных — увеличиваются (рис. 19). Эти закономерности являются предпосылками для возможности использования их в качестве типоморфных признаков.

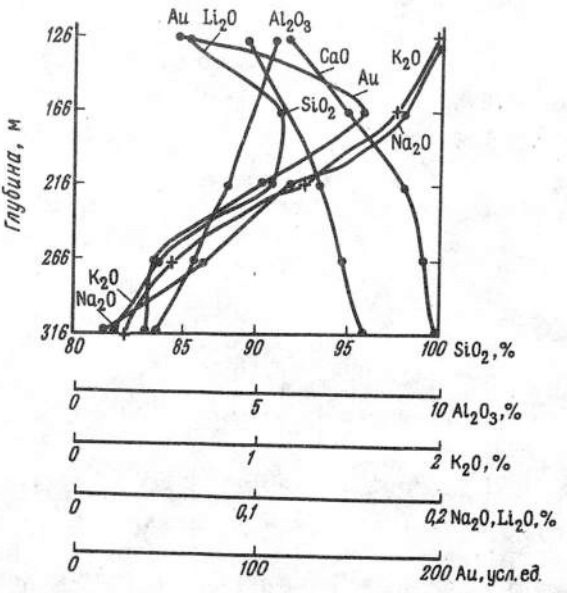


Рис. 18. Изменение содержаний петрогенных элементов в полосчатом кварце с глубиной

В кварце месторождений среднеглубинных формаций отмечается увеличение с глубиной калинатрового отношения в 4 раза, для месторождений малоглубинной формации (Балейское рудное поле) оно уменьшается, и на всем интервале глубин наблюдается резкое преобладание калия над натрием. Несмотря на постоянное присутствие в кварце среднеглубинных месторождений лития, концетрации его более чем на порядок ниже таковых для натрия и калия, а Na_2O/Li_2O уменьшается с глубиной (рис. 20). В кварце месторождений малоглубинных формаций наряду с литием постоянно присутствуют рубидий и цезий, а концентрации лития достигают десятых долей процента. При этом средние значения концентраций калия в продуктивном кварце в 3 раза выше, чем в непродуктивном.

Типоморфное значение рудных элементов-примесей

Вариации концентраций элементов-примесей в кварце месторождений различных рудных формаций. Жильный кварц всегда содержит определенные количества примесей рудных элементов. Свинец и медь являются сквозными элементами, и сам факт присутствия их не указывает на рудноформационную принадлежность месторождений. Бериллий характерен для кварца месторождений олова, вольфрама и редких элементов. Олово и

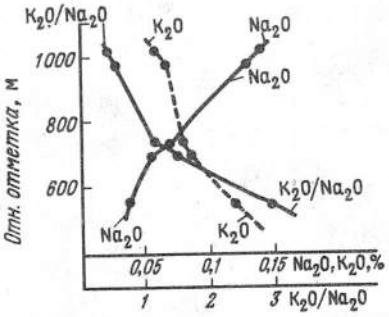


Рис. 19. Изменение с глубиной усредненных концентраций Na_2O, K_2O и величины K_2O/Na_2O в кварце среднеглубинного месторождения

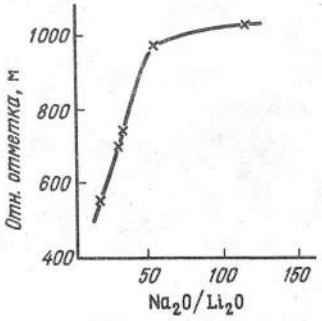


Рис. 20 Изменение с глубиной величины отношения концентраций Na_2O и Li_2O в кварце среднеглубинного месторождения

вольфрам в кварце, содержащем ниобий и бериллий, указывают на принадлежность его к месторождениям олова и вольфрама. Появление висмута наряду с этими элементами также является показателем вольфрамитовой минерализации, а присутствие вместо висмута сурьмы, мышьяка и серебра при отсутствии ниобия и непостоянном присутствии бериллия указывает на поздние ассоциации касситерит-силикатной формации и продуктивные ассоциации месторождений сульфидно-касситеритовой формации.

Средние значения концентраций, среднеквадратичные отклонения и величины отношений средних содержаний ряда элементов оказываются типичными для кварца месторождений определенных генетических типов и рудных формаций.

Кварц пегматитов характеризуется низкими концентрациями ограниченного круга элементов — бериллия, меди, свинца, железа и германия. Типоморфными элементами являются бериллий и германий с очень равномерным распределением ($\sigma_n < \bar{x}$).

Кварц из кварц-вольфрамитовых жил в грейзенах (рис. 21 и 22) в отличие от пегматитового содержит мышьяк, висмут, вольфрам и тантал. Для всех элементов $\sigma_n \leqslant \bar{x}$, но для бериллия $\sigma_n > 3\bar{x}$; концентрации меди выше концентраций свинца, мышьяка и вольфрама.

В ряду золоторудных формаций, расклассифицированных по фациям глубинности, концентрации элементов-примесей и их отношения для многих из них изменяются закономерно. Для глубинных золото-кварцевых месторождений характерен относительно чистый кварц, содержащий медь, железо и свинец. Отличием от незолотоносных формаций является $\sigma_n > \bar{x}$. Концентрации золота в кварце уменьшаются от 14 до 3,3 г/т от глубинных формаций к среднеглубинным, а σ_n увеличивается от 2 до 5 $\bar{x}$. Равномерное распределение золота характерно для золото-сульфидно-кварц-магнети-

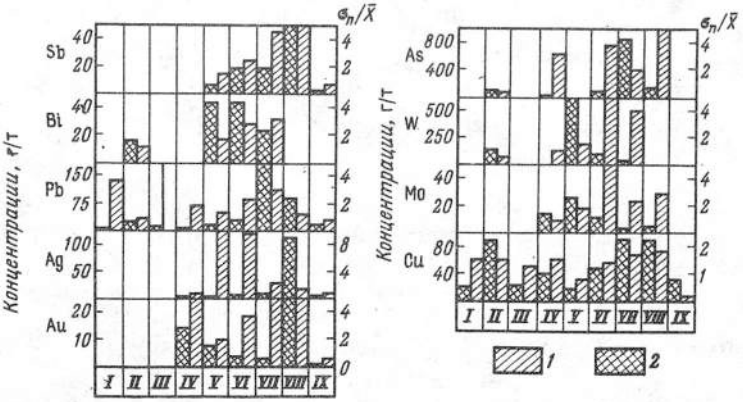


Рис. 21. Концентрации рудных элементов-примесей в жильном кварце и оценка их среднеквардратических отклонений относительно средних значений для месторождений девяти различных рудных формаций.

I — пегматиты; *II* — грейзеновая кварц-вольфрамитовая формация; гидротермальные месторождения: *III* — глубинные золото-кварцевые; *IV* — переходные к среднеглубинным золото-сульфидно-кварцевые, *V* — золото-кварц-сульфидно-магнетитовые, *VI* — среднеглубинные золото-кварцевые убогосульфидные, *VII* — золото-сульфидно-кварцевые, *VIII* — малоглубинные золото-серебряные. *IX* — среднеглубинные, халцедоновидный кварц. *1* — концентрации рудных элементов-примесей; *2* — среднеквадратические отклонения относительно средних значений

товой формации, переходной от глубинных к среднеглубинным. Поэтому для отнесения к золоторудным формациям типоморфным признаком может быть соотношение величин среднеарифметических концентраций и их среднеквадратических отклонений, а внутри ряда формаций — величины $\bar{x}$. Концентрации серебра в отличие от золота возрастают в ряду золоторудных глубинных и среднеглубинных формаций от 1 до 4,5 г/т при $\sigma_n > 2\bar{x}$. Максимальные концентрации серебра присущи кварцу месторождения малоглубинных формаций ($\bar{x}$ = 113 г/т при σ_n = 142). Отношение средних величин концентраций золота и серебра уменьшается от 11,66 до 0,006 (минимум — в халцедоновидном кварце заключительных стадий формирования среднеглубинных месторождений).

Концентрации мышьяка в кварце возрастают в рассматриваемом ряду формаций. Следует отметить, что лишь кварц Балейского рудного поля содержит высокие и очень неравномерные концентрации мышьяка ($\sigma_n > 4\bar{x}$), тогда как для десятков других рудных полей малоглубинных формаций Востока СССР этот элемент в кварце не обнаруживается. Поэтому он не может быть типоморфным элементом для малоглубинных золото-серебряных месторождений.

Висмут распространен в кварце вольфрамовых месторождений грейзеновой формации и золоторудных месторождений среднеглубинных формаций. Максимальные его концентрации наблюдаются

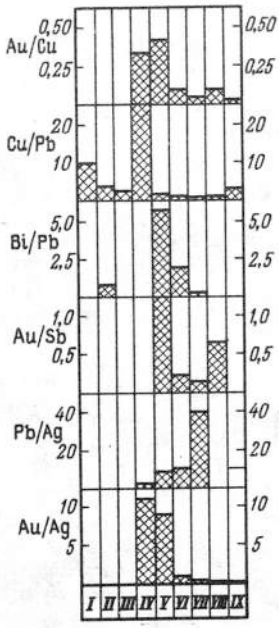


Рис. 22. Величины отношений концентраций рудных элементов-примесей в жильном кварце месторождений девяти различных рудных формаций. Обозначения рудных формаций см. на рис. 21

в кварце месторождений, переходных от глубинных к среднеглубинным. В ряде среднеглубинных месторождений отмечается увеличение концентрации висмута с глубиной.

По характеру распределения меди выделяется из общей совокупности лишь кварц золото-кварц-сульфидно-магнетитовой формации: минимум величины концентрации ($\bar{x}$ = 19 г/т) и равномерное распределение ($\sigma_n < \bar{x}$).

Содержания свинца в кварце возрастают в ряду формаций от глубинных к среднеглубинным. Минимальные его концентрации присущи кварцу из пегматитов.

Молибден не характерен для кварца пегматитов и собственно вольфрамитовых месторождений, локализованных в грейзенах. В кварце золоторудных месторождений, за исключением глубинных золото-кварцевых, он образует концентрации от 1,7 до 26,2 г/т. Максимум их определен в кварце золото-кварц-сульфидно-магнетитового месторождения.

Распределение вольфрама в кварце собственно вольфрамитовых месторождений по сравнению с золоторудными равномерно ($\sigma_n < 0{,}5\ \bar{x}$). В кварце глубинных месторождений золото-сульфидно-кварцевой формации отмечены низкие относительно равномерно распределенные концентрации вольфрама ($\sigma_n \sim \bar{x}$ = 11 г/т), а среднеглубинных месторождений подобных формаций — относительно высокие и неравномерные ($\sigma_n > \bar{x}$ = 31 г/т). Высокие концентрации вольфрама присущи кварцу из месторождения золото-кварц-сульфидно-магнетитовой формации ($\sigma_n > 1{,}5\ \bar{x}$ = 690 г/т).

Относительно высокие концентрации тантала присущи только кварцу вольфрамитовых месторождений из грейзенов ($\sigma_n \leqslant 0{,}5\ \bar{x}$ = = 29 г/т).

Сурьма является типоморфным элементом кварца среднеглубинных и некоторых малоглубинных золоторудных месторождений. Обогащенность кварца сурьмой обусловлена общей геохимической специализацией определенных минерагенических провинций. Наблюдается возрастание концентрации сурьмы в кварце сопряженных рядов рудных формаций примерно в 10 раз.

В рассматриваемом ряду золоторудных формаций величины отношений концентраций Au и Ag, Au и Cu, Bi и Pb уменьшаются от среднеглубинных к малогубинным; они достаточно специфичны для кварца месторождений малоглубинных формаций и отлича-

Таблица 9

Изменение с глубиной концентраций рудных элементов-примесей в кварце полиформационного рудного поля и их отношений

Рудная формация	Отн. отметка, м	Au	Ag	As	Sb	Pb	Cu	Mo	Bi	W	Au/Ag	Ag/Sb	Ag/Pb	Pb/Bi	Sb/Bi
Среднеглубинная золото-кварц-арсенопиритовая	450	1,1	1,3	133	158	67,4	15,8	9,0	5,7	0,3	0,85	0,008	0,02	11,8	28
Среднеглубинная золото-кварц-пиритовая	325	0,09	0,6	83	108	10,0	77,5	22,8	15,5	18,8	0,02	0,006	0,06	0,6	7
Среднеглубинная золото-кварц-турмалин-пиритовая	300	0,4	0,5	42	60	5,8	12,0	8,3	4,8	0,9	0,8	0,008	0,07	1,2	12,5
Переходная к глубинной золото-кварц-актинолит-магнетитовая	225	0,8	1,0	9	5,8	9,2	18,8	26,2	49,0	692,0	0,8	0,17	0,10	0,2	0,11

ют его от остальных. По отношению концентраций молибдена и вольфрама резко выделяется кварц золото-сульфидно-кварцевых месторождений, переходных от глубинных к среднеглубинным. Величина Pb/Ag закономерно возрастает в ряду среднеглубинных формаций в 50 раз. В этом же ряду уменьшаются Cu/Pb и Au/Sb. В типичных малоглубинных месторождениях (Балейское рудное поле) величина Au/Sb больше, чем в среднеглубинных.

Изменение концентраций элементов-примесей с глубиной. Кварц одного из золоторудных полей Забайкалья, где представлен ряд рудных формаций от переходной к глубинной золото-кварц-актинолит-магнетитовой до золото-кварц-сульфидной среднеглубинной, характеризуется вариациями в распределении рудных элементов-примесей, которые приведены в табл. 9. Из таблицы видно, что с глубиной в кварце однонаправленно уменьшаются концентрации мышьяка, сурьмы и свинца. Кварц, развитый на больших глубинах золото-кварц-актинолит-магнетитовой формации, резко отличается от остальных высокими концетрациями висмута и вольфрама, величинами Ag/Sb и Au/Pb (максимальные для кварца в рудном поле), Pb/Bi и Sb/Bi (минимальные). Максимальные значения Pb/Bi и Sb/Bi присущи кварцу верхних золото-кварц-арсенопиритовых частей жил. В случае совмещения жил золото-кварцевой и золото-кварц-полиметаллической формаций происходит накопление в кварце сурьмы, серебра и золота, как это было показано нами на примере одного из рудных полей Забайкалья [49].

На одном из типичных золото-кварцевых месторождений (Чукотка) установлено, что в пределах продуктивной части жилы с глубиной происходит незначительное увеличение концентраций меди, свинца, цинка, мышьяка и железа (рис. 23). Это объясняется следующим. Горными выработками вскрыт продуктивный отрезок жилы, в верхней части которого (горизонт 477 м) развиты гигантские пустоты и хрусталеносные погреба с кристаллами кварца, выросшими из остаточных растворов на субстрате жильного крупнозернистого кварца, не содержащего заметных концентраций примесей халькофильных элементов. С глубиной (горизонт 276 м) в жиле начинают преобладать относительно ранние генерации кварца с промышленными содержаниями золота и более высокими концентрациями халькофильных элементов. Подобное распределение меди, свинца и цинка наблюдалось в кварце продуктивной части жил Саралинского (Кузнецкий Ала-Тау), Дарасунского (Забайкалье) и других рудных полей. Для нижних частей продуктивных отрезков жил среднеглубинных месторождений золота характерно опережающее возрастание концентраций цинка по сравнению со свинцом, появление устойчивой встречаемости молибдена и вольфрама.

Изменчивость с глубиной распределения рудных элементов-примесей в кварце месторождений малоглубинной золото-серебряной формации рассмотрим на примере Балейского рудного поля.

Допродуктивный серый кварц с реликтами вмещающих пород

содержит минимальные количества золота (3—12 г/т) и максимальные — сурьмы и меди. Концентрации золота и серебра в нем уменьшаются с глубиной, а сурьмы — образуют максимум на переходе от зоны богатых руд к верхнему выклиниванию; распределение меди и свинца не имеет направленности в изменениях с глубиной. Величины отношений концентраций золота и свинца, серебра и меди с глубиной закономерно уменьшаются (табл. 10).

В полосчатом кварце концентрации золота, серебра и сурьмы имеют максимум на уровне богатых руд (рис. 24). В целом концентрации золота и сурьмы на глубине в 2—3 раза меньше, чем в приповерхностных частях жил, и в 5—8 раз меньше по сравнению с уровнем повышенных содержаний золота. Концентрации меди с глубиной уменьшаются, свинца — увеличиваются. Отношения концентраций золота и серебра, золота и свинца, золота и меди на фоне общего уменьшения с глубиной имеют максимальные значения на обогащенном золотом интервале жилы. Величины отношения концентраций серебра и сурьмы увеличиваются с глубиной (см. табл. 10).

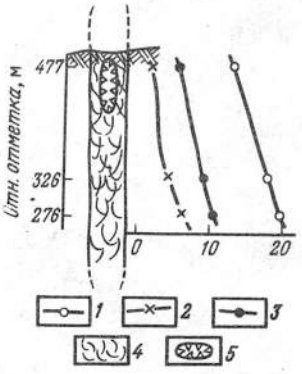


Рис. 23. Изменение с глубиной содержаний элементов-примесей (в г/т) в жильном кварце месторождения глубинной золото-кварцевой формации.

1 — Cu; *2* — Pb; *3* — Zn; *4* — кристаллически-зернистый кварц; *5* — пустоты с кристаллами кварца

Таблица 10

Отношения концентраций золота и элементов-примесей в кварце Балейского рудного поля

Разновидность кварца	Горизонт, м	Au/Ag	Ag/Sb	Au/Pb	Au/Cu	Ag/Cu
Допродуктивный	126	0,12	0,582	10,2	0,08	0,68
	166	0,70	0,016	3,4	0,23	0,33
	216	0,37	0,84	0,84	0,02	0,05
	266	0,88	0,095	0,42	0,095	0,11
Полосчатый	126	3,05	0,24	2,1	0,58	0,19
	166	4,36	0,24	3,0	1,72	0,40
	216	2,66	0,34	3,33	1,22	0,46
	266	1,52	0,74	2,21	0,96	0,63
	316	0,49	1,68	1,31	0,28	0,56
Массивный	126	3,05	0,26	2,1	0,58	0,19
	166	3,66	0,15	3,29	1,29	0,35
	216	2,05	0,78	2,78	0,67	0,38
	266	1,32	0,43	1,74	0,76	0,57

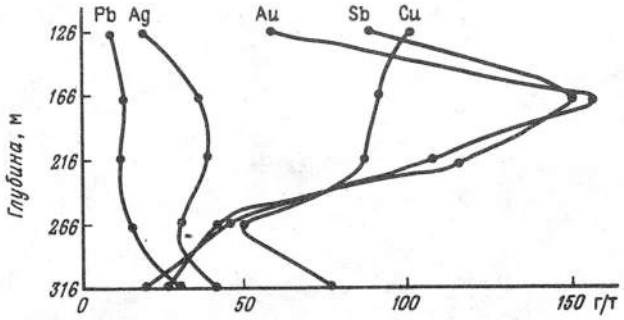


Рис. 24. Изменение с глубиной концентраций золота и элементов-спутников в полосчатом кварце

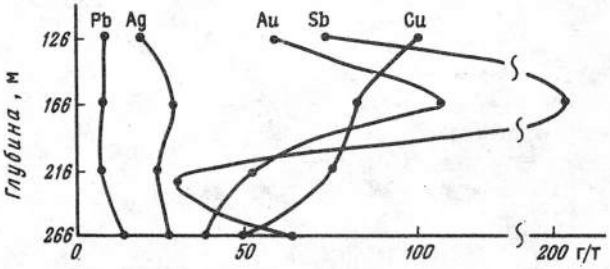


Рис. 25. Изменение с глубиной концентраций золота и элементов-спутников в массивном кварце

В массивном кварце распределение рассматриваемых элементов такое же, как и в полосчатом, но средние значения концентраций золота и свинца меньше, а сурьмы — больше (рис. 25).

Выявляется устойчивая опосредствованная связь концентраций калия и золота и единая тенденция к уменьшению с глубиной концентраций K_2O и золота в общих пробах.

В целом распределение рассмотренных элементов в продуктивном кварце с глубиной закономерно и отражает положение в пространстве уровня богатого оруденения. В допродуктивном кварце золото-серебряное отношение примерно на порядок меньше, чем в полосчатом продуктивном, а в пределах рудного столба эти отношения для полосчатых кварцев в 10 раз выше, чем на глубине, где оруденение более чем в 5 раз беднее. Величина Ag/ Sb, наоборот, минимальна на уровне богатого оруденения. Эти признаки являются типоморфными и могут быть использованы в качестве критериев оценки эрозионного среза.

Таблица 11

Изменение состава последовательно образующихся агрегатов кварца

Структурно-текстурный тип кварца	Au, г/т	SiO_2, %	Al_2O_3, %	CaO, %	Fe, %
Массивный (конец первого ритма)	63, 67	94,06	4,28	0,19	0,07
Фестончатый (начало второго ритма)	74	88,56	7,59	0,37	0,077
Серый тонкошестоватый с участком фестончатого	96, 36	96,36	2,46	0,06	0,067
Пластинчато-шестоватый (конец второго ритма)	0,2	96,45	2,68	0,06	0,04
Полосчатый, массивно-пластинчатый с пустотами, выполненными глинистым материалом (начало третьего ритма)	Менее 0,1	95,35	3,32	0,04	0,05
Массивно-шестовато-гребенчатый (конец третьего ритма)	Менее 0,1	97,57	2,0	0,01	0,03

Изменение состава жильного кварца в сложнопостроенных частях жил и агрегатах

В ритмично построенных тонкополосчатых существенно кварцевых агрегатах месторождений малоглубинной золото-серебряной формации выявлено ритмично-периодическое изменение концентраций золота, серебра, меди и железа. При этом максимальные их величины установлены в слоях, образовавшихся на ранних этапах формирования агрегатов, когда вместе с кварцем выделялись гидрослюды, монтмориллонит, сульфиды и сульфосоли. При формировании таких агрегатов периодически происходит относительное возрастание содержаний рудных элементов в системе в начале каждого из последующих ритмов по сравнению с концом предыдущего на фоне уменьшения абсолютных значений их концентраций. К концу роста таких сложных агрегатов уменьшались содержания также и петрогенных элементов (алюминия, натрия и др.), но увеличивалась доля их структурной примеси в кварце.

Рассмотрим сказанное на примерах. В табл. 11 приведены сокращенные анализы кварца различной текстуры. Концентрации Cao, Al_2O_3 и Fe ритмично уменьшаются от начала к концу в трех ритмах; в целом от ранних генераций (фестончатые, полосчатые) к поздним (массивно-шестовато-гребенчатые) их значения тоже уменьшаются. Содержание SiO_2 ритмично возрастает от начала к концу ритма; увеличение его от ранних генераций к поздним указывает на возрастающую чистоту кварца.

Распределение золота также зависит от структурно-текстурных особенностей кварца и его парагенезиса. Максимальные концентра-

ции золота свойственны фестончатому и массивному кварцу, минимальные — последним генерациям пластинчатого и массивно-шестовато-гребенчатого кварца.

Приведенные различия в составе структурно-текстурных разновидностей кварца свидетельствуют о возможности использования их в качестве типоморфных признаков. Усредненные данные (табл.12 свидетельствуют о том, что тонкополосчатые агрегаты жильного кварца, содержащие максимальные концентрации золота, имеют самые большие примеси алюминия, калия и натрия. В пластинчатом кварце, являющемся зачастую слабозолотоносным и образующемся наряду с гребенчатым кварцем в конечные стадии кристаллизации, золото редко составляет высокие концентрации.

В некоторых случаях исследовались отдельные разновидности слоистого кварца, сложенного из множества макро-и микрослоев. Наиболее ярким и представительным примером является агрегат крупнофестончатой текстуры, составляющий из 21 слоя (рис. 26). Агрегат сложен четко разделяющимися ритмично сложенными пачками. Первый ритм (слои *1—3*) сложен чередующимися массивно-полосчатыми, слабоглинистыми кварцевыми агрегатами, глинистость которых уменьшается к концу ритма. В этом же направлении уменьшается количество сульфидов. Видимое золото — в основании ритма. Мощность пачки — до 4,5 см. Второй ритм (слои *4—8*) имеет сложное строение, обусловленное тем, что в нем находятся обломки ранее образовавшегося слоистого кварца, облекающиеся радиально-лучистыми полосчатыми агрегатами кварца. Обломки и облекающий их кварц содержат сульфосоли серебра, золота, глинистые минералы и являются продуктами одного и того же флюида, причем обломки — результат взламывания слабо закристаллизованного материала ранее сформированного слоя. В основании этого ритма выделяются глинистые минералы, пирит и сульфосоли серебра (слой *4*). В средней части ритма кварц становится чище (слои *5* и *6*). Венчает ритм переходный слой *8*, на котором залегает обогащенное золотом и сульфосолями основание третьего ритма (слои *9—11*).

Слой *9* постепенно переходит от тонкослоисто-фестончатого в массивно-фестончатый и массивный (слой *10*), в верхней части которого

Таблица 12

Данные химического анализа структурно-текстурных разновидностей жильного кварца Балейского рудного поля

Структурно-текстурный тип кварца	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	Au
Тонкополосчатый	5,55	2,11	0,22	0,002 — 0,06
Массивный	3,73	0,26	0,10	0,0002 — 0,007
Пластинчатый	1,82	0,20	0,10	0,001 — 0,002

на переходе к слою *11* вновь обильно выделяется золото, но сульфосолей серебра здесь мало. Слой *11*, завершающий третий ритм, в основании слоисто-фестончатый, а вверху — массивно-фестончатый. В зоне перехода между третьим и четвертым ритмами (слои *12—13*) присутствуют каолинит и гидрослюды, с которыми вместе образовались и сульфосоли серебра. Здесь находится и золото, но оно не такое крупное, как на переходе от массивного (слой *10*) к слоисто-фестончатому (слой *11*). Ранний слой четвертого ритма (слой *12*) более глинистый, фестончатый, а поздний — массивный. Золото приурочено к глинисто-фестончатому кварцу. Массивный кварц сменяется микрогребенчато-радиально-лучистым, на который накладывается фестончатый кварц следующего ритма, содержащий золото и сульфосоли серебра (слои *14—15*). В верхней части ритма (верхняя часть слоя *15*) вновь появляется массивный кварц, в котором выделений золота мало. Количество их возрастает на переходе к следующему слою (слой *16*). В основании его — микрофестончатый кварц, переходящий в массивный (слой *17*). Этот ритм уже менее четко переходит в следующий, сложенный существенно массивным, иногда микропластинчатым кварцем (слой *18*). На переходе вновь обильное выделение золота при очень незначительном количестве сульфосолей серебра. Этот ритм состоит из шести слоев массивного и микрозернистого массивно-ноздреватого (участками микропластинчатого) кварца, связанных постепенными переходами (слой *19*). Достаточно четко образованием тончайшей двухслойной пачки (не более 0,7 мм мощностью) серого микрошестоватого фестончатого кварца с обильным выделением глинистых минералов и золота отмечается начало последнего ритма, образовавшегося в заключительную стадию формирования рассмотренного слоистого участка жилы. Он сложен массивным и микромассивно-шестоватым, массивно-ноздреватым и микрошестовато-гребенчатым кварцем (слои *20* и *21*). Концентрации золота значительны только в основании ритма, к концу его они сравнительно невелики.

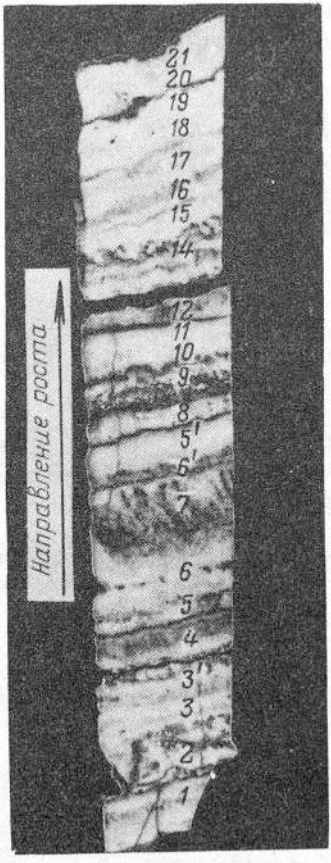


Рис. 26. Ритмично-слоистый существенно кварцевый агрегат. Пояснения см. в тексте

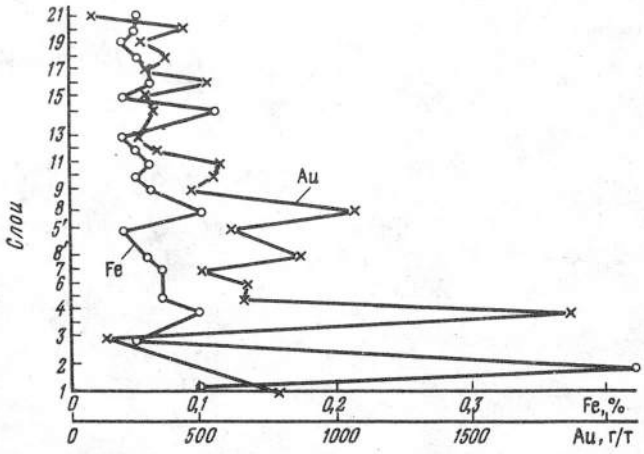


Рис. 27. Изменение концентраций золота и железа в ритмично построенном кварцевом агрегате.

По вертикалной оси отложены относительные расстояния между центрами слоев

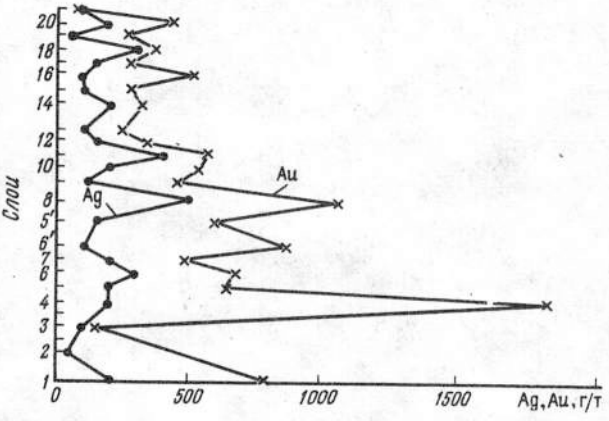


Рис. 28. Изменение концентраций золота и серебра в слоистом ритмично построенном агрегате

Детальное изучение распределения золота и железа (рис. 27), золота и серебра (рис. 28), золота и меди (рис. 29) в слоистом фестончатом агрегате показало, что с ритмикой и направленностью в изменении текстур и структур кварца и здесь взаимосвязано распределение указанных выше элементов.

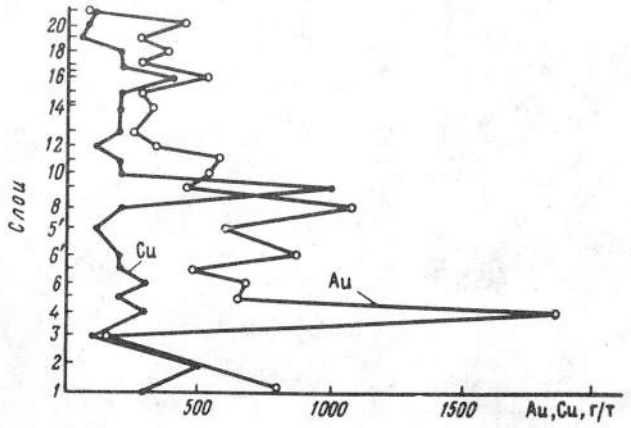


Рис. 29. Изменение концентраций золота и меди в слоистом ритмично построенном агрегате

Отсутствие однозначной корреляции концентраций железа и золота свидетельствует о преимущественной связи золота не с сульфидами железа (арсенопирит и пирит), а с сульфосолями серебра и меди. Однако и здесь прямые корреляции характерны лишь для участков с обильным выделением сульфосолей вблизи границ ритмов, где в связи с резкими изменениями условий выпадали в щелочной обстановке глинистые минералы и увлекали их с собой. В срединных частях ритмов прямые корреляции нарушены, и выделение из раствора серебра и меди в виде сульфосолей предшествует выделению золота. Весь приведенный материал свидетельствует, что на фоне ритмичного изменения концентраций золота, серебра, меди и железа происходит их уменьшение в верхних, позже образованных частях ритмов, нежели в нижних, ранних. Эта направленность хорошо сопоставляется с общей направленностью в изменении облика кварца и его состава по мере кристаллизации флюида сначала из резко пересыщенных, затем — слабо пересыщенных растворов.

Особенности распределения Au, Ag, Cu, Fe, K_2O, Na_2O и Li_2O в сложно построенной приконтактовой части (мощностью до 2 м) жилы из первой рудной зоны рудного поля представлены на рис. 30. На контакте в кварце содержатся обломки измененных гранитных галек, которые обволакиваются светло-серым массивным, а затем полосчатым кварцем, постепенно переходящим в тонкополосчатый фестончатый агрегат, содержащий тонкодисперсное золото, сульфосоли серебра и гидрослюду. Этот кварц постепенно переходит в более грубополосчатый с макроскопически заметной вкрапленностью пирита и сульфосолей меди. Здесь присутствуют монтмориллонит и каолинит. Затем образуется слой массивного микроглобулярно-сферолитового кварца с малой примесью сульфидов, гидрослюд и монтмориллонита. Далее в массивном кварце отмечается

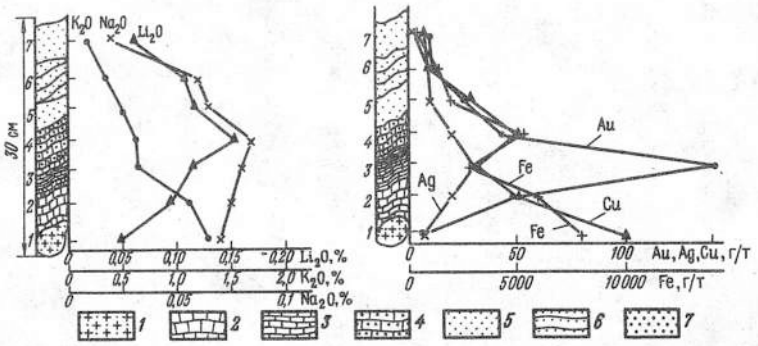


Рис. 30 Изменчивость содержания щелочей и рудных элементов в крупном последовательно образованном агрегате кварца.

1 — обломок гранитной гальки; *2* — полосчатый кварц; *3* — тонкополосчатый фестончатый; *4* — грубополосчатый; *5* — микроглобулярно-сферолитовый; *6* — массивный со слабо выраженной слоистостью; *7* — массивный, микропластинчатый

слабо выраженная слоистость, которая затем исчезает, кварц становится белым, массивным и содержит мельчайшие друзовидные пустотки. В шлифах заметны скелетные и дендритовидные кристаллы и сростки — начало формирования микропластинчатой текстуры.

В пределах этого участка жилы концентрации K_2O постепенно уменьшаются от контакта к центру жилы, что связано с уменьшением количества гидрослюд и тончайших пылевидных включений обломков вмещающих пород. Концентрации натрия и лития возрастают от контакта к грубополосчатому слою. В нем фиксированы относительно высокие количества монтмориллонита и каолинита, содержащих эти элементы, подвижность которых значительно выше, чем калия. В массивном и слоисто-массивном кварце количества натрия и лития резко уменьшаются. Максимумы содержаний золота и серебра отмечаются в фестончатом тонкослоистом кварце, причем концентрации золота резко преобладают над концентрациями серебра. Возможно, что Au и Ag образуют здесь твердый раствор с соотношением 823:176. В участке грубополосчатого кварца с сульфидами количество золота лишь в 2 раза превышает количество серебра, которое частично находится также и в форме сульфосолей. Минимальные концентрации золота и серебра фиксированы в слое массивного кварца. Железо и медь имеют двухмаксимумное распределение в пределах рассмотренной части жилы: у контакта, где обильны сульфиды, и в грубополосчатом слое. Концентрации их коррелируют с концентрациями золота и серебра только на отдельных участках жилы, после того как основная масса последних уже выпала в самородном виде.

В пределах всего разреза по жиле золото и серебро распределяются довольно сложно, но в соответствии с распределением струк-

турно-текстурных разновидностей кварца. В симметрично построенных жилах они приурочены к краевым их частям, а в осевых частях, где обычно формируются массивные, пластинчатые или друзовидно-массивные агрегаты, золото и серебро не образуют значительных концентраций, за исключением тех случаев, когда их минералы здесь отлагаются из поздних остаточных или связанных с мобилизацией и переотложением ранее сформированного золота растворов (на что указывала еще Н.В. Петровская).

Примером такой аномалии является разрез на горизонте 316 м. Вскрываемая там жила построена асимметрично: в висячем боку — мощная зона пластинчатого и пластинчато-массивного кварца с видимым золотом, в лежачем — слоистый и массивно-слоистый кварц, в котором обильны сульфосоли меди. Максимальные концентрации золота и серебра находятся здесь не в полосчатом, а в пластинчатом кварце, в котором минимальные концентрации калия и максимальные — натрия. С последним в этом разрезе во всех текстурных разновидностях кварца хорошо коррелирует золото. Максимальное содержание натрия в пластинчатом кварце связано с большей вероятностью его изоморфного вхождения в структуру кварца. Калий концентрируется в агрегатах полосчатого кварца. Отношения золота к серебру для кварца полосчатых и массивных агрегатов в этом локальном разрезе близки к таковым в целом по первой рудной зоне. Это же можно сказать и о величинах отношений концентраций золота и меди, серебра и ртути, а также K_2O/Na_2O.

Приведенные данные о распределении золота и элементов-примесей в кварце на разных уровнях его организации свидетельствуют о единстве тенденций и закономерностей, обусловленных близповерхностными условиями формирования, последовательностью образования и пространственным положением текстурных разновидностей кварца.

О форме вхождения некоторых рудных элементов-примесей в кварц

В последнее время появились модели, описывающие способ вхождения в кварц многих рудных элементов, позволяющие подойти к объяснению поразительно устойчивых связей рудных элементов с кварцевыми жилами и наметить границы определенных структурно-фазовых состояний в эволюции кварцево-рудных флюидов. А.Н. Трухин, В.С. Балицкий и другие исследователи [4, 5, 42, 46] показали возможность вхождения в кристаллы кварца большого числа химических элементов, в том числе промышленно ценных.

Особое значение приобретает изучение электронно-дырочных центров в кварце при анализе форм вхождения меди, серебра, золота, олова, вольфрама, никеля и других рудных элементов. В.С. Лысаков, В.П. Солнцев и Р.И. Машковцев на примере искусственного кварца, активированного ионами меди в процессе его выращивания,

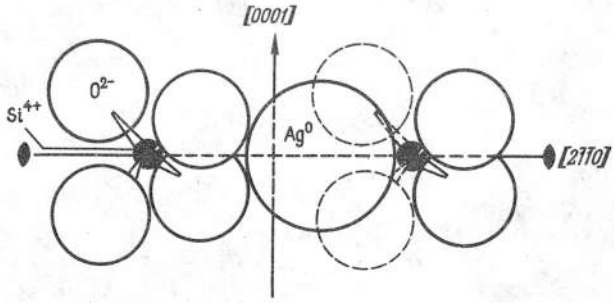


Рис. 31. Модель локализации атомов серебра в структурном *c*-канале. По В.П. Солнцеву, Р.И. Машковцеву.

Вакансии ионов кислорода изображены штриховой линией, атомы кремния зачернены

основываясь на результатах исследований Ю.Р. Закиса, А.Н. Трухина, В.С. Балицкого и других специалистов, сделали вывод о том, что медь располагается в межтетраэдрических пустотах в окружении ионов кислорода. По их данным, ионы меди ответственны за возникновение центров люминесценции в кварце.

В.П. Солнцев и Р.И. Машковцев [42] показали, что медь и серебро могут находиться в кварце, образуя центры Ag^{2+} и Cu^{2+}, а также в виде нейтральных атомов Ag^0 и Cu^0, которые стабилизируются в структурных каналах, образуемых кольцами кремнекислородных тетраэдров, и локализуются вблизи двухвакансионного дефектного тетраэдра с образованием центров $AgSiO_2$ и $CuSiO_2$ (рис. 31). В связи с тем, что эти центры стабилизируются лишь при температуре жидкого азота, можно полагать, что серебро и медь при комнатной температуре достаточно подвижны в решетке кварца. Последнее может иметь большое значение для понимания миграции химических элементов в твердофазной среде.

М.Я. Щербаковой, В.И. Сотниковым и рядом других исследователей в 1976 г. обнаружена тенденция к прямой зависимости между количеством O—(Al)-центров в кварце и содержанием в нем золота. Установлено вхождение золота в структурные каналы кварца; предположено, что катион Au^+ захватывался из растворов вместе со щелочами при замещении кремния алюминием. Кварц выступает как "природный сорбент" золота; отсюда закономерно предположение о возможности использования отмеченной выше зависимости при оценке золотоносности кварцевых жил.

ГАЗООТДЕЛЕНИЕ ПРИ НАГРЕВАНИИ, СОСТАВ И ТЕМПЕРАТУРЫ ГОМОГЕНИЗАЦИИ ГАЗОВО-ЖИДКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ КАК ТИПОМОРФНЫЙ ПРИЗНАК

Примеси газов и воды в кварце. Изучение газовой составляющей включений и информация о газах, рассеянных в объеме минеральных индивидов и их агрегатов, имеют большое значение для типоморфического и рудноформационного анализов, а также для понимания эволюции минералообразующих систем.

В кварце постоянно присутствуют водород, углекислота, азот (и аргон) [22, 43, 46], в отдельных случаях обнаруживаются углеводороды [38, 43]. Газ, извлеченный из образцов кварца оловорудных месторождений путем измельчения их в шаровой вакуумной мельнице, содержал двуокись углерода, сероводород и водород [46]. С.К. Кныш и Н.А. Шугурова полагают, что водород и углеводороды присущи включениям кварца глубинных месторождений в отличие от среднеглубинных и малоглубинных. В.А. Булынников отмечает повышенные концентрации углеводородов в минералах фронтальных и центральных (срединных) частей золоторудных тел и обеднение ими прикорневых участков. В.С. Монахов и другие исследователи приводят примеры увеличения концентраций водорода и групп CH в кварце поздних золотоносных генераций.

Газоотделение при нагревании. Методом фракционной конденсации изучены температуры и количества воды, углекислоты и азота, выделяющихся из образцов кварца различного генезиса при их нагревании. Комплексирование этого метода с масс-спектрометрическими исследованиями и с изучением ИК-спектров позволило получить информацию о формах вхождения воды в кварц.

Интенсивное выделение воды из массивного кварца ядер пегматитов начинается с 300 °C; в интервале температур 300—500 °C выделяется основная масса воды, заключенная в этом кварце (рис. 32, кривая 7), что соответствует температурам разрыва газово-жидких включений. В табл. 13 приведены температуры гомогенизации включений, выше которых происходит их разрыв. Меньшая часть воды, выделяющаяся при 100—300 °C, обусловлена примесями слабосвязанных OH_x-групп. На рис. 33 видна полоса поглощения при 3400 $см^{-1}$, интенсивность которой уменьшается при нагревании и практически исчезает при 450 °C (рис. 34). О продолжении выделения воды из кварца пегматитовых тел при нагревании до 700 °C свидетельствуют данные масс-спектрометрического изучения образца из Адун-Челона, где отмечены две стадии веделения воды — при 200—370 °C и при 560—580 °C. Последний интервал температур соответствует α—β-переходу в кварце, когда в результате перестройки структуры происходит разрыв связей и выделение OH-групп (а возможно, и H^+, входящего в междоузлия при гетеровалентном компенсационном изоморфизме). Соответствующий этому температурному интервалу максимум на масс-спектограмме значительно слабее первого [43].

Кривые выделения воды из кристаллов кварца золотоносных

Таблица 13

Характеристика изученных образцов кварца

Формационный тип кварца	Моно- или поликристаллический агрегат	Часть кристалла	Температуры гомогенизации газово-жидких включений, °С	Температуры максимума газоотделения, °С
Пегматитовый	Поликристалл	—	300—500	500
Пегматитовый	—''—	—	270—400	300—400
Среднеглубинный	Кристалл	Основание	246—285	300
—''—	—''—	Головка	230—270	200—300
—''—	Монокристалл	Внутренняя часть головки	270—300	200—300
—''—	—''—	Приграннная часть призмы	160—265	200
—''—	—''—	Головка	150—250	200—300
—''—	—''—	Внутренняя часть	260—270	200—300
—''—	—''—	Зона призмы	200—260	200—300
—''—	—''—	Зона призмы основания	150—282	300—400
Малоглубинный	Массивный поликристаллический агрегат	—	180—200	100—300 400—500
—''—	Полосчатый поликристаллический агрегат	—	190—220	100—300 400—500

жил среднеглубинной формации при их нагревании имеют иной характер (см. рис. 32, кривые *1*—*6*; рис. 35). Максимум на кривых соответствует интервалу растрескивания газово-жидких включений — 200—300 °С (см. табл. 13). Наибольшее из этих значений температур соответствует образцу из основания кристалла (см. рис. 32, кривая *1*), наименьшее — образцу из его головки (там же, кривая *2*). Максимумы выделения воды из внутренних высокотемпературных частей кристалла (там же, кривые *3*, *4*, *6*) сдвинуты в сторону более высоких температур по сравнению с приграннными их частями (там же, кривая *5*). Изучение ИК-спектров показало, что выделение воды при нагревании таких образцов сопровождается постепенным уменьшением интенсивности полосы поглощения в области 3400 $см^{-1}$. Это свидетельствует о том, что наряду с водой газово-жидких включений из кварца выделяется и структурная вода (см. рис. 35).

Динамика выделения воды из тонкозернистого кварца жил малоглубинной формации существенно отличается от рассмотренной выше. На рис. 36 представлены кривые выделения воды из двух образцов такого кварца (кривые *2* и *3*) в сравнении с кристаллом из жилы среднеглубинной формации (кривая *1*). Несмотря на низкие температуры растрескивания газово-жидких включений (см. табл. 13),

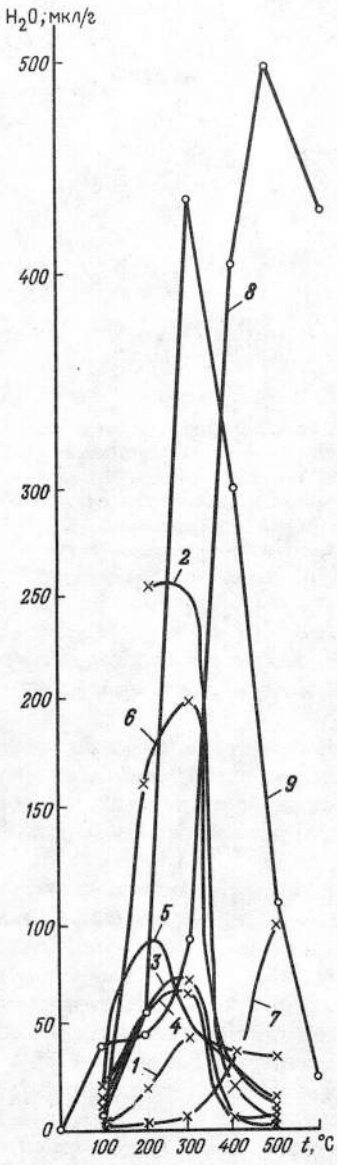


Рис. 32. Кривые выделения воды при нагревании кварца различных рудных формаций

1–6 — кварц месторождения среднеглубинной формации; *7* — β-кварц; *8–9* — кварц Балейского рудного поля

максимум этого процесса приходится на 500 °С. Начало выделения воды соответствует, по-видимому, разрыву крупных газово-жидких включений; в интервале температур 200—300 °С интенсивность процесса нарастает постепенно. При температурах около 300 °С нарастание становится резким. Последнее, а также максимум при 500 °С обусловлены, вероятно, разрушением различного типа неструктурных OH_x-дефектов, которые, судя по ИК-спектрам, постоянно присутствуют в кварце Балейского рудного поля. Присутствие таких дефектов обусловлено особенностями кристаллизации этого кварца из пересыщенных густых щелочных растворов (pH суспензии — около 9). Примеры неструктурных примесей OH^-, Na^+, K^+, Al^{3+}, образующих неоднородности размером 20—30 нм, описаны Л.И. Цинобером и В.Е. Хад-

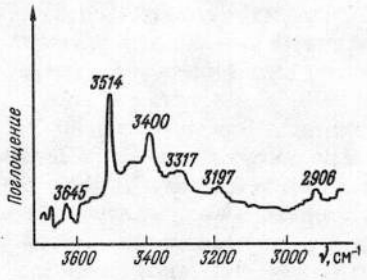


Рис. 33. ИК-спектр поглощения пластинки β-кварца

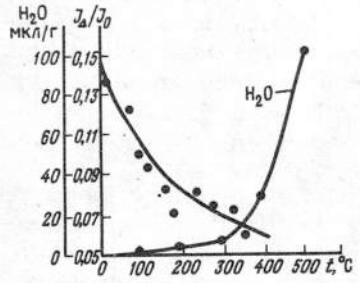


Рис. 34. Зависимость интенсивности полосы поглощения 3400 $см^{-1}$ на ИК-спектре и количества выделенной при нагревании воды для кристалла β-кварца от температуры

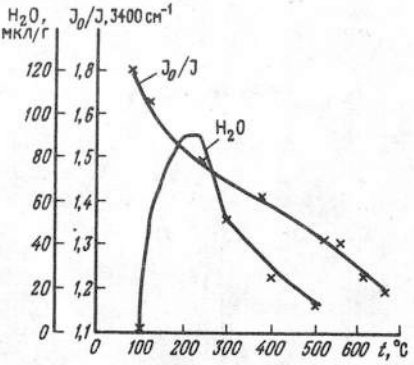


Рис. 35. Зависимость интенсивности полосы поглощения 3400 $см^{-1}$ ИК-спектра и количества выделенной при нагревании воды для кристалла кварца месторождения среднеглубинной формации от температуры

жи в искусственном кварце, кристаллизовавшемся из концентрированного раствора в щелочной среде. Наличие молекулярной воды в таких образцах показано методом ИКС [34].

Минимальное количество воды при нагревании выделялось из параморфозы по β-кварцу, максимальное — из кварца жил малоглубинной формации (табл. 14). Эта особенность находит объяснение в различных скоростях кристаллизации рассматриваемых кварцевых агрегатов.

Анализ характера выделения воды из кварца показывает тройственную ее природу. Сначала выделяется неструктурная вода газово-жидких включений, температуры выделения колеблются от 200 до 400 °С, нарастая в ряду: месторождения малых глубин — месторождения средних глубин — месторождения больших глубин (β-кварц пегматитов Адун-Челона и β-кварц пегматитов Волыни). Затем при температурах 400—600 °С с максимумом в области 500 °С выделяется неструктурная вода дефект-каналов и скоплений OH_x-групп, не входящих в кристаллическую решетку. Максимальные концентрации такой формы воды характерны для низкоупорядоченного кварца из жил малоглубинных формаций. Структурная вода в виде OH_x-групп, входящая в структурные каналы или междоузлия кремнекислородных тетраэдров при гетеровалентном изоструктурном изоморфизме, выходит из решетки при α—β-переходе (560—580 °С); доля ее невелика.

Миграция воды в каналах и субмикроскопических трещинах в кварце при его нагревании оказывает существенное влияние на его электропроводность [22] и другие свойства, в частности на фильтрацию или кристаллизацию рудных компонентов в зернистых его агрегатах.

Данные о количественных соотношениях содержания воды в различных структурно-текстурных разностях кварцевых агрегатов Балейского рудного поля приведены на рис. 37. Интенсивное выделение воды из массивного кварца (кривая *1*) соответствует 200 °С и связано с началом массового разрыва включений. В интервале температур 200—300 °С происходит в основном разрыв вторичных включений. Максимум выделения воды приходится на 400 °С, что указывает на высокую температуру его образования. В интервале 400—600 °С выделяется вода из дефект-каналов и структурных каналов и межузельная вода, высвобождающаяся при α—β-переходах. Максимальное количество воды (до 9935 мкл/г газовой фазы) выделяется из фестончатого кварца (см. рис. 37, кривая *2*) в два этапа — в интервале 100—300 °С (адсорбированная, вода газово-жидких включений) и после 300 °С. Возрастание количества воды при нагревании выше 500 °С частично связано с выделением ее из слоистых силикатов. Полосчатый кварц (там же, кривая *3*) с относительно хорошо раскристаллизованными индивидами выделяет также большое количество воды (8406 мкл/г) в два этапа — между 200 и 300 °С (газово-жидкие включения) и при 400—600 °С (дегидратация примеси каолинита, выход воды из дефект-каналов и структурной воды). Остальные структурно-текстурные разности агрегатов кварца выделяют значительно меньше воды. Максимум на кривой выделения воды из полосчато-массивного кварца (там же кривая *4*) приходится на 500 °С. Из пластинчатого кварца (там же кривая *5*) вода газово-жидких включений выходит в интервале 200—400 °С, а из позднего, самого низкотемпературного — гребенчатого (там же кривая *6*) — при 200 °С. Структурная вода выходит в интервале 400—600 °С.

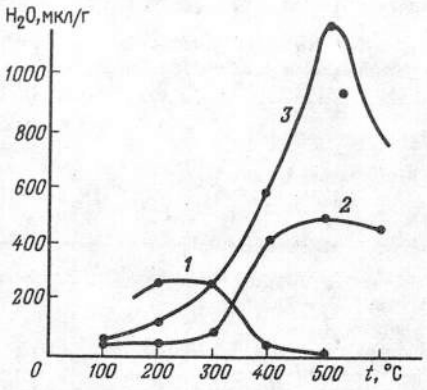


Рис. 36. Кривые выделения воды при нагревании кварца малоглубинной и среднеглубинной формаций.

1 — среднеглубинная формация; *2, 3* — малоглубинная формация

Таким образом, кривые выделения воды дают большую минералогическую информацию. Действительно, количество воды максимально в трех ранних группах генераций, при этом значительная часть ее в различных формах удерживается несовершенной структурой

Таблица 14

Выделение воды при нагревании из кварца различных рудных формаций

Вид кварца, рудная формация		Количество выделяющегося пара воды при различных температурах, мкл/г							Число проб
		100 °С	200 °С	300 °С	400 °С	500 °С	600 °С	Сумма	
Сотовый кварц ядра пегматита, параморфоза по β-кварцу		0,4	5,1	5,3	33,2	102,0	—	148,7	1
Розовый α-кварц из блоковой зоны пегматита		7,3	56,7	450,0	304,0	112,0	25,3	955,3	1
Жильный кварц и кристаллы месторождения среднеглубинной золото-кварцевой формации	$\bar{x}$	132,0	263,0	212,0	166,0	152,2	192,8	1118,0	7
	σ_n	134	109	108	156	187	134		
Жильный кварц месторождения среднеглубинной золото-сульфидно-кварцевой формации	$\bar{x}$	55,2	127,0	344,1	249,4	212,0	132,8	1120,5	16
	σ_n	51	79	233	137	96	49		
Жильный кварц глубоких горизонтов месторождения малоглубинной золото-серебряной формации	$\bar{x}$	9,8	121,2	406,8	380,4	356,3	260,4	1534,9	3
	σ_n	6	133	110	12	24	74		
Жильный кварц месторождения, переходного к малоглубинной золото-серебряной формации	$\bar{x}$	97,9	255,0	350,0	488,1	458,3	425,0	2074,2	12
	σ_n	58	112	143	187	258	181		
Типичное месторождение малоглубинной золото-серебряной формации (Балейское рудное поле)	$\bar{x}$	295,0	470,9	727,8	1093,8	1486,0	1604,5	5678,0	18
	σ_n	273	473	590	722	850	970		

кварца и при нагревании легко удаляется. Кварц поздних групп генераций содержит меньшее количество воды; выходит она в основном при декрепитации включений; значительно меньшее ее количество входит в структуру, но прочнее удерживается в связи с большей упорядоченностью последней, что находит отражение и в величинах СКС (см. ниже).

Максимумы выделения воды в интервале 200—400 °С являются с известным допущением показателями температур минералообразования. Последнее важно для тонкозернистых агрегатов кварца близповерхностных месторождений, так как включения, пригодные для изучения методом гомогенизации, они содержат редко.

Количество выделяющейся из кварца воды в различных температурных интервалах закономерно варьирует у образцов, образовав-

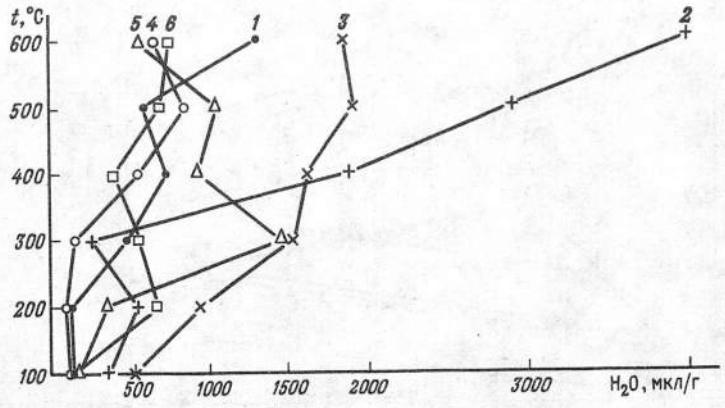


Рис. 37. Кривые выделения воды при нагревании различных структурно-текстурных разностей кварцевых агрегатов Балейского рудного поля.

1 — массивно-полосчатый ранний из контакта с вмещающей породой; *2* — фестончатый полосчатый продуктивный; *3* — полосчатый с лучисто-шестоватыми отдельными слоями, продуктивный; *4* — полосчато-массивный, массивный, слабозолотоносный; *5* — массивно-шестоватый, друзовидный, пластинчатый; *6* — гребенчатый

шихся в разных условиях и является одним из его типоморфных и формационных признаков, что имеет значение при оценке его рудоносности.

Количество выделяющейся при нагревании кварца углекислоты обычно на порядок меньше, чем воды. Формы температурных кривых выхода H_2O и CO_2 подобны (рис. 38). Объем выделяющейся углекислоты максимален для месторождений малоглубинных по сравнению с глубинными и среднеглубинными. С уменьшением глубин формирования месторождений наблюдается резкое относительное возрастание доли воды в кварце по сравнению с углекислотой (рис. 39). Эта закономерность прослежена как по кристаллам, так и по зернистым агрегатам кварца.

Количества выделяющегося из кварца азота для некоторых главных формационных типов месторождений даны в табл. 15. В общем из кварца месторождений малоглубинных формаций выделяется большее количество азота, чем из кварца пегматитов и глубинных и среднеглубинных месторождений. Доля азота по сравнению с водой (N_2 / H_2O) возрастает в ряду формаций: пегматиты — малоглубинные золото-серебряные — глубинные и среднеглубинные золоторудные.

Валовое содержание воды и углекислоты в жильном кварце. Связь со светопропусканием. Г.Н. Вертушковым разработана и предложена методика определения воды и углекислоты в кварце, являющаяся упрощенным вариантом метода фракционной конденсации. Указанным способом по 150 пробом определено, что потери при прокаливании и количество газа взаимосвязаны и что

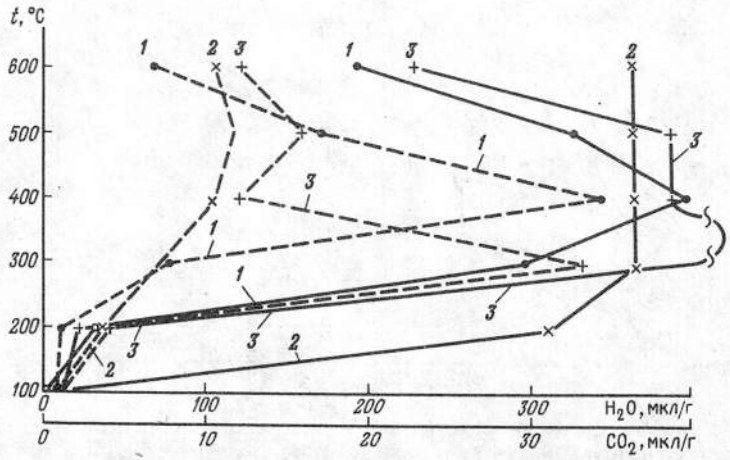


Рис. 38. Кривые выделения воды (сплошная линия) и углекислоты (пунктирная линия) при нагревании агрегатов кварца, различной текстуры;

1 — шестовато-друзовидный; *2* — массивно-друзовидный; *3* — мелкодрузовидный

Таблица 15

Выделение азота при нагревании из кварца различных рудных формаций

Генетическая и формационная принадлежность кварца	Количество азота, мкл/г	N_2/H_2O
Пегматиты		
Сотовый кварц	2,7	0,02
Розовый кварц в блоковой зоне	21,9	0,02
Гидротермальные месторождения		
Глубинные золото-сульфидно-кварцевые	134,6	0,10
Среднеглубинные золоторудные	114,8	0,10
Переходные к малоглубинным золото-серебряным	112,7	0,05
Типичные малоглубинные золото-серебряные	297,3	0,05

суммарное количество H_2O и CO_2 возрастает с увеличением размеров зерен.

Анализ результатов определения светопропускания, потерь при прокаливании, валового состава газово-жидких включений, включая и водный показатель (H_2O/CO_2), в жильном кварце экзоконтакта Шилово-Коневских, Кочкарского, Увильдинского, Джабык-Карагайского, Адамовского, Челябинского и Каибского (в Казахстане) гранитных массивов, Сысертского и Уфалейского мигматитовых

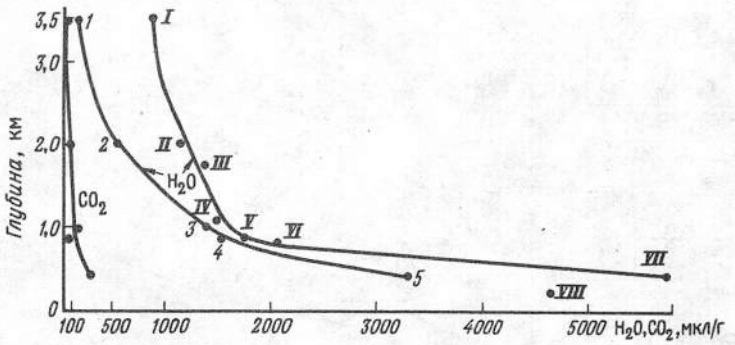


Рис. 39. Кривые выделения воды и углекислоты при нагревании кристаллов (арабские цифры) и жильного кварца (римские цифры) месторождений различных фаций глубинности.

Кристаллы кварца: *1* — сотовый, из камерного пегматита (1 проба); *2* — из среднеглубинного золото-кварцевого месторождения (4 пробы); *3* — из глубоких горизонтов малоглубинного золото-серебряного месторождения (3 пробы); *4* — из золото-серебряного, переходного к малоглубинным месторождениям (3 пробы); *5* — из типичного малоглубинного месторождения (1 проба).
Жильный кварц: *I* — розовый, из блоковой зоны камерного пегматита (1 проба); *II* — из среднеглубинного золото-кварцевого месторождения; *III* — из золото-сульфидно-кварцевого месторождения (16 проб); *IV*—*V*— из глубоких горизонтов малоглубинного золото-серебряного месторождения (3 пробы); *VI*— из переходного от среднеглубинных к малоглубинным существенно серебряного месторождения (12 проб); *VII*— из типичного малоглубинного золото-серебряного месторождения (17 проб); *VIII*— тонкозернистый, сахаровидный, халцедоновидный, послепродуктивный, близповерхностный (5 проб)

комплексов, ряда хрусталеносных месторождений, золотоносных жил и др. [18—20] показал, что перечисленные показатели взаимосвязаны. На основании изучения большого количества данных (около 1000 анализов, часть которых взята нами с опубликованных фактографических карт) можно сделать следующие выводы: существует обратная зависимость величины светопропускания кварца от количества содержащихся в нем влаги и газа, что подтверждает общие выводы Г.Н. Вертушкова и его последователей [18—20]: водный показатель увеличивается с возрастанием общего количества влаги и газа; в общем случае происходит увеличение содержания влаги и газа с уменьшением величины зерен кварца.

Однако при раздельном рассмотрении указанных зависимостей для кварца, характеризующегося различной степенью изменений и разным отношением к оруденению, выясняется следующее. Жильный кварц хрусталеносных месторождений характеризуется максимальными значениями светопропускания, относительно высоким содержанием суммы влаги и газа и большим водным показателем. Рудоносный жильный кварц отличается умеренным светопропусканием, низким водным показателем и самым высоким содержанием суммы влаги и газа.

По Ю.А. Соколову, на расстоянии 0,1—0,5 м от зон грануляции происходит уменьшение светопропускания в 4,5 раза, увеличение

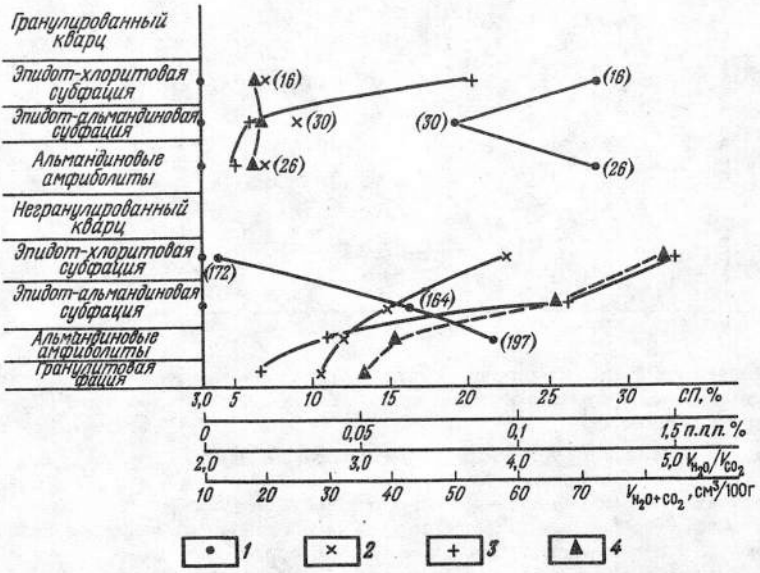


Рис. 40. Характеристика кварца из жил в породах различных фаций метаморфизма.

1 — светопропускание (СП); *2* — потери при прокаливании (п.п.п.); *3* — водный показатель (V_{H_2O}/V_{CO_2}); *4* — сумма влаги и газа ($V_{H_2O+CO_2}$). В скобках — число определений.

п. п. п. и общего содержания H_2O и CO_2 в 4 раза, воды в 5 раз, углекислоты в 2—2,5 раза, водного показателя в 2 раза. Все это указывает на очищение кварца в процессе грануляции.

Аналогичные тенденции выявлены и для кварца из жил, локализованных в породах различных метаморфических фаций. Усредненные параметры, полученные в результате обработки литературных данных, представлены на рис. 40. Гранулированный кварц характеризуется минимальными суммарными содержаниями влаги и газа, количество которых практически неизменно. Водный показатель резко уменьшается по мере увеличения интенсивности метаморфизма, свидетельствуя об уменьшении доли воды и увеличении доли углекислоты. Эти данные вполне согласуются с приведенными выше для жильного кварца месторождений различных фаций глубинности. Потери при прокаливании являются минимальными (0,02—0,03 %), и их вариации незначительны (на рисунке не показаны). Светопропускание гранулированного кварца максимально, не имеет тенденции к однонаправленному изменению с увеличением метаморфизма, и, в общем, уменьшение его в эпидот-альмандиновой субфации связано с увеличением общей концентрации влаги и газа. В целом гранулированный кварц в жилах на Урале, находящихся в породах эпидот-хлоритовой субфации, имеет реликтовый характер, так как жиловмещающие породы в большинстве случаев претерпели регрессивный

метаморфизм, при котором кварц изменяется слабо. В случае же прогрессивного метаморфизма он еще не подвергся интенсивным изменениям (пластическим и хрупким деформациям, пластинкованию и др.), которые способствуют появлению в зернах газово-жидких включений и замутнению. В условиях эпидот-альмандиновой фации эти процессы интенсифицируются, кварц мутнеет, количество газово-жидких включений возрастает и начинается процесс грануляции, завершающийся в условиях амфиболитовой фации.

Негранулированный кварц жил, локализованных в породах эпидот-хлоритовой субфации, имеет минимальное светопропускание, которое возрастает с увеличением метаморфизма. В этом же направлении уменьшается суммарное содержание влаги и газа (и п. п. п.) с увеличением доли последнего в процессе усиления метаморфизма. При этом величина водного показателя также становится меньше. Водный показатель поэтому может быть одним из индикаторов фаций метаморфизма и глубинности минералообразования.

Г.Н. Вертушковым и Ю.А. Соколовым показано, что в целом водный показатель для жильного кварца изменяется от 0,3—0,5 до 10—15. Минимальные его значения типичны для кварца из гранитов и сотового кварца ядер пегматитовых тел, а наиболее высокие характеризуют кварц низкотемпературных жил. Отношение H_2O/CO_2 определяется, по их данным, прежде всего температурой минералообразования (в °С) и может быть использовано для ее вычисления по формуле $t = 560 - 280 \lg H_2O/CO_2$.

Будучи справедливой для глубинных процессов, она оказывается непригодной для определения температур минералообразования в близповерхностных условиях, например для золото-серебряных, флюоритовых и других месторождений малоглубинной формации, формирование которых на первых стадиях происходит с интенсивным газоотделением, в первую очередь — углекислоты.

Для сопоставления жильных месторождений удобным, по-видимому, окажется использование отношения Na/K в газово-жидких включениях. Г.Н. Вертушков и Ю.А. Соколов показали, что суммарная концентрация K и Na в них обычно находится в пределах 10^{-3} % и коррелирует с водным показателем. Отношение Na/K уменьшается с повышением температур минералообразования, что является в общем случае отражением увеличения роли калия в высокотемпературных процессах (калишпатизация, грейзенизация и др.).

Соотношение жидкой и газовой фаз во включениях. При изучении включений в кварце среднеглубинных месторождений установлено [49], что с глубиной в них возрастает количество газовой фазы (табл. 16).

Выявленная тенденция характерна для первичных включений. Вторичные включения, температуры гомогенизации которых варьируют в пределах 260—190 °С, широко развиты на месторождениях в участках наложения турмалиновой, сульфидной и сульфосольной минерализации. В табл. 17 обобщен имеющийся в литературе анали-

Таблица 16

Изменение с глубиной соотношения жидкой и газовой фаз и температуры гомогенизации газово-жидких включений в кварце золото-кварцевого убогосульфидного месторождения

Горизонт, м	Число проб	Газовая фаза, %	Температура гомогенизации, °С
782	8	26	295
750	2	28	310
735	4	32	311
704	18	33	313
550	20	35	319
415	2	43	350

тический материал по соотношению газовой и жидкой фаз в кварце из месторождений различных рудных формаций.

С учетом этих данных можно предложить такую рациональную температурную классификацию гидротермальных месторождений: высокотемпературные (500—370 °С), среднетемпературные (370—200 °С) и низкотемпературные (200—50 °С).

Среди среднетемпературных месторождений на основе изменения в граничных пределах этих температур структурного состояния воды в кварце, фиксируемого резким увеличением его электропроводности [22, 44], началом резкого увеличения выхода воды при его нагревании в вакууме, а также началом появления эндотермического пика на кривых ДТА при прецезионных исследованиях, могут быть выделены две подгруппы — формирующиеся при температурах выше 250—280 и ниже 250—280 °С. Характерно, что при 300—280 °С начинается массовое формирование тяжелых полимеров кремнезема [29].

На возможные изменения в условиях кристаллизации именно в этих температурных границах указывала Е.И. Доломанова. Однако такая классификация, как известно, не учитывает многих факторов, из которых важнейшие — глубина образования месторождений и минеральные парагенезисы кварца. По сути дела, главная ценность информации, которая может быть получена исследованием сингенетических включений в кварце, заключается в возможности получения рудоинформационных критериев классификации рудных месторождений.

В качестве главных признаков, определяющих термодинамические параметры рудообразующих флюидов и продуктов их деятельности, нами взяты усредненные численные значения пределов изменений температур и глубин (интерпретированных по геологическим данным или с использованием определений давлений, полученных разными авторами изучением включений в минералах).

Вариации минеральных парагенезисов и последовательности их образования определяются прежде всего химическим составом рудогенерирующих флюидов и соотношением в них и во вмещающих

Таблица 17

Соотношение газовой и жидкой фаз и температура гомогенизации газово-жидких включений в кварце разных месторождений

Месторождения	Температура гомогенизации, °С / Газовая фаза, %	Давление, $\times 10^5$ Па
Пегматитовые	600—200 / 370	90—35	1,5—0,45
Грейзеновые	500—200 / 500—370	90—30	1,65—0,5
Гидротермальные:			
больших глубин, высоких температур	450—200 / 450—370	50—25	1,2—0,35
средних глубин, средних температур	370—170 / 370—210	40—15	1,0—0,23
малых глубин, средних и высоких температур	410—120 / 360—160	25—0	0,3—0,13
малых глубин, низких температур (кварц-флюоритовые)	200—50	25—0	0,3—0,05
близповерхностные в базальтовых покровах (опал, халцедон, аметист)	200—40	15—0	0,1—0,03

Примечание. Во второй графе таблицы в знаменателе указаны температуры образования главных продуктивных минеральных парагенезисов.

горных породах компонентов, определяющих изменчивость кислотности и щелочности, а в близповерхностных условиях — и окислительно-восстановительным потенциалом и скоростью изменения термодинамических параметров.

Изучение газово-жидких включений в кварце различных золоторудных полей Забайкалья многими авторами показало, что температуры их гомогенизации составляют 450—120 °С. В среднем кварц продуктивных ассоциаций забайкальских месторождений содержит включения, гомогенизирующиеся при 370—305 °С. При этом в пределах одного рудного района, в частности Балейского, отчетливо различаются продуктивные кварцы среднеюрских среднеглубинных пневматолито-гидротермальных (температуры от 450—350 до 235—210 °С) проявлений и нижнемеловых среднетемпературных близповерхностных (температуры от 360 до 160 °С).

Давление, существовавшее при образовании золотоносного кварца, варьирует, по оценкам ряда исследователей, от 27,5 до 205,9 МПа при изменении глубин от 120 до 460 м для малоглубинных и от 800 до 3000 м для среднеглубинных проявлений.

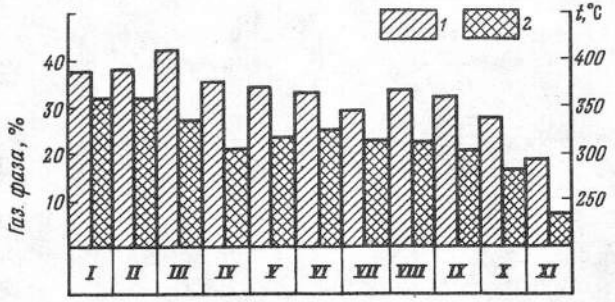


Рис. 41. Объем газовой фазы (1) и температуры гомогенизации (2) газово-жидких включений в жильном кварце месторождений различных рудных формаций.

Грейзены: *I* – кварц-вольфрамитовые, *II* – кварц-касситеритовые, *III* – кварц-вольфрамит-молибденитовые. Гидротермальные месторождения: *IV* – глубинные золото-кварцевые; переходные к среднеглубинным: *V* – золото-сульфидно-кварцевые, *VI* – золото-кварц-сульфидно-магнетитовые; среднеглубинные: *VII* – сульфидно-касситеритовые, *VIII* – золото-кварцевые убогосульфидные, *IX* – золото-сульфидно-кварцевые; малоглубинные: *X* – переходные к среднеглубинным, *XI* – типичные золото-серебряные

В целом для продуктивных минеральных парагенезисов характерны довольно узкие температурные интервалы минералообразования: между глубинными рудными формациями оловянно-вольфрамовых месторождений, связанных с грейзенами, и малоглубинными золото-серебряными, связанными с жерловыми и дайковыми фациями вулкано-плутонических структур, разница составляет менее 100 °С, а максимальные и минимальные значения температур гомогенизации газово-жидких включений в кварце сопоставимы, особенно для месторождений переходных типов, в которых кварц-адуляровые жилы часто непосредственно увязываются с магматическими телами (рис. 41).

Более того, в ряду золоторудных формаций по усредненным величинам температур гомогенизации газово-жидких включений нельзя сказать об однонаправленном возрастании температур минералообразования с глубиной вообще. Кроме того, по температурам гомогенизации газово-жидких включений нельзя отличить кварц малоглубинных, среднеглубинных или глубинных месторождений. Гораздо большую информацию о глубине образования дает соотношение жидкой и газовой фаз во включениях, которое изменяется однонаправленно, будучи обусловлено давлением. Во включениях в кварце в типичных малоглубинных месторождениях количество газовой фазы, главным образом углекислоты, в 2 раза меньше, чем в глубинных месторождениях (см. рис. 41).

В последние годы рядом исследователей получены данные о повышении температур гомогенизации газово-жидких включений в кварце не с глубиной, а при приближении к верхним частям рудных жил и зон. Подобная картина наблюдалась нами на одном из золото-серебряных месторождений Приамурья. Тенденция к концентрической температурной зональности отмечалась также по первой руд-

Таблица 18

Изменение с глубиной объема газовой фазы и температуры гомогенизации газово-жидких включений в кварце золото-серебряного месторождения

Глубина, м	Газовая фаза, %		Температура гомогенизации, °С	
	$\bar{x}$	σ_n	$\bar{x}$	σ_n
0	36,6	9,5	300	25
50	25,6	2,3	256	21
100	24,4	2,3	250	18
150	17,0	4,0	220	2
200	35,4	11,0	286	27

ной зоне Балейского рудного поля. Эта концентричность увязывается с распределением по вертикали структурно- текстурных разностей жильных существенно кварцевых агрегатов, она же проявляется в изменчивости ряда свойств. Как правило, преимущественно развиты в верхних половинах жил и рудных зон ритмично-слоистые, полосчатые, фестончатые агрегаты, характерные для ранних стадий формирования кварцевых жил. Они же по минерало-термометрическим данным (табл. 18) оказываются наиболее высокотемпературными.

Приведенный материал свидетельствует о существовании обратной температурной зональности, обусловленной тем, что в близповерхностных условиях кристаллизация жильного материала идет сверху вниз, начинаясь в передовых частях, где градиенты температур и давлений максимальны.

ПАРАМЕТРЫ ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И ИХ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ СОСТАВА И УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ КВАРЦА

Естественная термолюминесценция кварца из месторождений различных рудных формаций. Обобщение литературных данных и материалов автора по ТЛ кварца из месторождений различных рудных формаций приведено на рис. 42.

Кварц пегматитов характеризуется постоянным присутствием на термолюмограммах (ТЛ-граммах) максимумов при температурах 220—250 и 290—320 °С, связанных с (Al/Li) - и (Al/Na) -центрами. Морионы камерных пегматитов отличаются постоянным присутствием пиков при 330—370 °С, связанных с Е-центрами и примесями титана.

Кварц месторождений грейзеновых формаций отличается наличием максимумов при 170—260 °С, для образцов из кварц-вольфрамитовых жил отмечаются также максимумы T_6 — T_{13}, а кварц из жил силикатно-касситеритовой формации практически всегда термолюминесцирует при температурах 280—320 и изредка при 330—350° С.

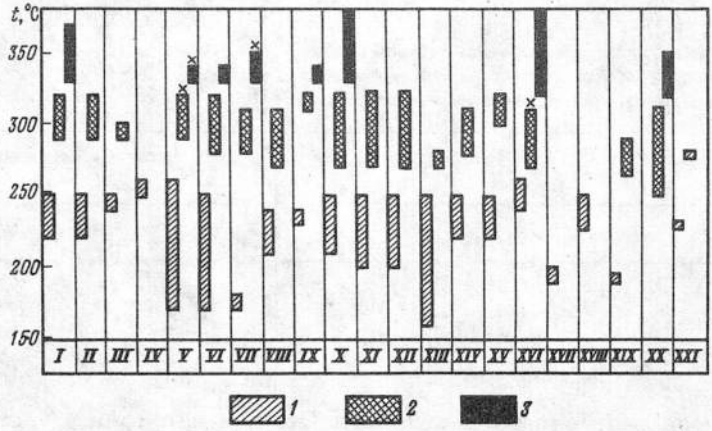


Рис. 42. Характерные интервалы температур максимумов ЕТЛ кварца месторождений различных генетических типов.

Пегматиты: *I* — камерные, *II* — редкометальные; грейзены: *III* — кварц-вольфрамитовые, *IV* — кварц-вольфрамит-молибденитовые, *V* — силикатно-касситеритовые (с вольфрамитом), *VI* — полевошпатово-кварц-молибденитовые: пегматоидный кварц; *VII* — жильный кварц первой генерации; гидротермальные месторождения: *VIII* — глубинные золото-кварцевые, *IX* — переходные к глубинным золото-кварцевые убогосульфидные; среднеглубинные: *X* — золото-кварцевые убогосульфидные, *XI* — золото-сульфидно-кварцевые, *XII* — переходные к малоглубинным кварц-адуляровые золото-серебряные (Au/Ag $< 0{,}1$) с сульфидами; малоглубинные: *XIII* — кварц-ферберит-киноварные, *XIV* — золото-серебряные кварц-адуляр-сульфидно-гидрослюдистые, *XV* — золото-серебряные кварц-адуляровые убогосульфидные, *XVI* — типичные золото-серебряные, золото-адуляр-гидрослюдисто-кварцевые убогосульфидные (Балейское рудное поле); хрусталеносные жилы: *XVII* — бесцветные кристаллы, *XVIII* — бесцветные радиационно устойчивые, *XIX* — цитриновые (Урал), *XX* — дымчато-цитриновые (Памир), *XXI* — бесцветный кварц альпийских жил. Знаком x отмечены интервалы температур редко наблюдаемых максимумов. *1* — $T_1 - T_5$; *2* — $T_6 - T_{10}$; *3* — $T_{11} - T_{13}$

Жильный продуктивный кварц молибденовых месторождений отличается только максимумами при 250—260 °С.

Кварц типичных гидротермальных глубинных месторождений отличается от всех остальных максимумами $T_1 - T_5$ и $T_6 - T_{10}$, имеющими узкие пределы колебаний температур (соответственно 210—240 и 270—310 °С) и отсутствием высокотемпературных максимумов. Для кварца золоторудных месторождений, переходных от глубинных к среднеглубинным, характерны ТЛ-граммы или с одним максимумом при 230—240 °С или с двумя в комбинациях 230—240 и 310—320 или 230—240 и 330—340 °С.

Кварц среднеглубинных золото-кварцевых убогосульфидных месторождений также характеризуется преимущественно ТЛ-граммами с двумя максимумами, из которых $T_1 - T_5$ (210—250 °С) присутствуют почти всегда, а часто в комбинации или с $T_6 - T_{10}$ (270—320 °С) или с $T_{11} - T_{13}$ (330—380 °С) Отличительный признак для них — высокотемпературные максимумы $T_{11} - T_{13}$.

Образцы кварца золото-сульфидно-кварцевых среднеглубинных и переходных к малоглубинным золото-серебряным имеют ТЛ-граммы преимущественно с двумя максимумами T_1—T_5 (200—250 °С) и T_6—T_{10} (270—320 °С). Кварц из малоглубинных золото-серебряных кварц-адуляровых убогосульфидных месторождений дает ТЛ-граммы с небольшими интервалами температур высвечивания (220—250 и 280—320 °С).

Жильный кварц Балейского рудного поля на ТЛ-граммах имеет максимумы при 240—260, 270—310 или 320—380 °С. Кварц ферберит-киноварных месторождений термолюминесцирует при низких температурах: первые максимумы наблюдались в интервале температур 160—250 °С, а вторые — 270—280 °С.

ТЛ-граммы бесцветных кристаллов кварца имеют только один максимум при 190—200 °С, бесцветных радиационно устойчивых — при 227—252 °С [47]. Два максимума имеют ТЛ-граммы всех остальных типов кристаллов: уральские цитрины — 190—195 и 265—290 °С, дымчато-цитриновые образцы с Памира — 250—310 и 320—350 °С, а "мармарошские диаманты" [38] — 230 и 280 °С.

Приведенный обзор температур максимумов ЕТЛ свидетельствует о существенных различиях их у кварца из месторождений различных генетических типов и рудных формаций. Поэтому они могут быть использованы в качестве типоморфных признаков кварца определенных рудных формаций.

Анализ отношений температур максимумов и интенсивностей ЕТЛ кварца из месторождений разных рудных формаций показывает, что T_1/T_2 варьирует незначительно в пределах 0,73—0,85 и характеризует различие глубины ловушек электронов. T_2/T_3 изменяется примерно в этих же пределах, но для кварца месторождений олова, вольфрама и молибдена оно более 0,8, среднеглубинных и малоглубинных золоторудных месторождений менее 0,8. При этом минимальное отношение получено для кварца Балейского рудного поля (0,74).

Кварц месторождений малоглубинной золото-серебряной формации дает ТЛ-граммы только с одним или двумя максимумами, и I_2 всегда больше I_3 (отношение их варьирует для кварца из этого типа месторождений от 1,11 до 1,71). Это отличает их от глубинных и среднеглубинных месторождений.

Изменение интенсивности ТЛ с глубиной. Для кварца большинства исследованных рудных полей, независимо от их рудноформационной принадлежности, установлена единая закономерность, заключающаяся в том, что с глубиной интенсивность ЕТЛ возрастает [49]. В табл. 19 приведены усредненные градиенты интенсивности ЕТЛ с глубиной в кварце золоторудных месторождений различных рудных формаций.

Максимальные значения градиента характерны для массивного кварца Балейского рудного поля и общих проб малоглубинного месторождения с олово-золото-серебряным оруденением. Минимальные

Таблица 19

Градиенты изменчивости с глубиной интенсивности ЕТЛ

Рудная формация	Размах глубин, м	Размах интенсивностей ЕТЛ, усл. ед.	Градиент ЕТЛ, отн. ед. на 1 м глубины	Примечания
Глубинная золото-кварцевая	201	20	0,099	
Среднеглубинная убого-сульфидная	470	66	0,14	
Переходная к малоглубинной золото-серебряной с сульфидами	346	225	0,65	Полосчатый кварц
Типичная малоглубинная:				
золото-серебряная подформация со слабым развитием адуляра (Балейское рудное поле)	190	226	1,19	Массивный кварц
		125	0,65	Полосчатый кварц
олово-золото-серебряная подформация с широким развитием адуляра	310	638	2,05	Размах оруденения принят по перпендикуляру к линии склонения рудного столба по верхней и нижней границам его выклинивания

величины градиентов присущи кварцу глубинных и среднеглубинных золото-кварцевых убогосульфидных месторождений.

Для кварца малоглубинных месторождений характерно увеличение с глубиной числа максимумов на ТЛ-граммах. Так, кварц приповерхностных частей Балейского рудного поля характеризуется только одним среднетемпературным пиком (от 220 до 280 °С). На глубоких горизонтах преобладает кварц с двумя максимумами ЕТЛ — при 220—240 и 300—340 °С. При этом интенсивность первого всегда больше.

Естественная термолюминесценция последовательно образованных частей кристаллов или агрегатов кварца. Изменение ЕТЛ от ранних к поздним частям кристаллов имеет различную направленность в зависимости от смены условий их образования. В кристаллах из камерных пегматитов и жильных месторождений горного хрусталя, образованных в спокойных условиях закрытых систем, наблюдается ритмичное уменьшение интенсивности ЕТЛ от оснований или срединных частей кристаллов к их головке, связанное с общим уменьшением в растворе алюминия и щелочных элементов к концу кристаллизации. Эта особенность характерна и для кристаллов из жил в оловоносных и вольфрамоносных грейзенах. В условиях динамичной изменчивости состава растворов, связанной с пос-

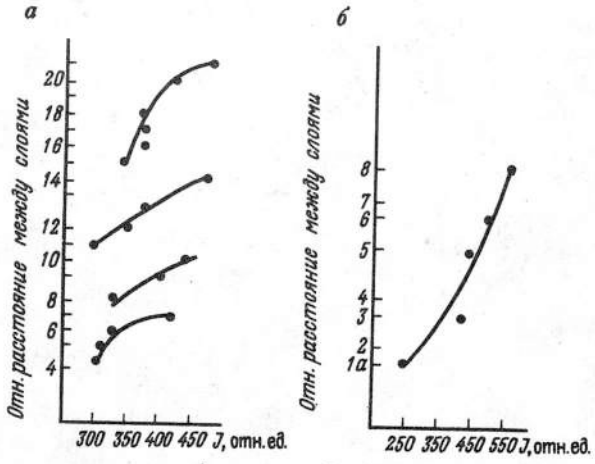


Рис. 43. Изменчивость ЕТЛ (t — 260—280 °С) в слоистых агрегатах кварца Балейского рудного поля.

По вертикальной оси — относительные расстояния между центрами слоев

туплением новых их порций, эта последовательность нарушается. В ряде золоторудных глубинных и среднеглубинных месторождений, где в растворах концентрации алюминия были невелики и возрастали по мере расходования кремнезема в процессе роста кристаллов, вероятность вхождения структурных примесей увеличивалась к концу процесса минералообразования, ЕТЛ значительной части кристаллов увеличивается от их оснований к головкам и от срединных частей к приграннным (особенно в приреберных частях зоны призм).

Изменчивость интенсивности ЕТЛ кварца в сложно построенных агрегатах из близповерхностных месторождений на примере Балейского рудного поля показана на рис. 43. Левая часть этого рисунка иллюстрирует увеличение интенсивности среднетемпературного максимума (260—280 °С) в каждом из ритмов (группы слоев *4—7*, *8—10*, *11—14*, *15—21* образца, представленного на рис. 26) от начала к концу формирования ритмично-слоистого агрегата. На рис. 43, *б* показаны вариации этого же параметра ЕТЛ кварца для сложного агрегата, состоящего из восьми последовательно образованных слоев. Приведенные данные свидетельствуют о том, что минимальная интенсивность ЕТЛ присуща кварцу из ранних полосчатых и массивно-полосчатых агрегатов, а максимальная — из пластинчатых, шестоватых и гребенчатых. Интенсивность ЕТЛ коррелирует с концентрациями примеси натрия [49], входящего в кварц в качестве компенсатора зарядов при замещении кремния алюминием.

Нарастание интенсивности ЕТЛ кварца в последовательно образованных структурно-текстурных разностях существенно кварцевых агрегатов проявляется в отдельных слойках, ритмах и в целых сечениях по жилам. Оно же характерно и для месторождения в целом, так как с глубиной, как это было показано выше (см. рис. 9), возрастает

доля массивных шестоватых и пластинчатых агрегатов. Подобные закономерности получены практически для десятка рудных полей и отдельных жил малоглубинной золото-серебряной формации.

ИК-СПЕКТРЫ КВАРЦА КАК ПРИЗНАКИ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ, ФОРМ ПРИМЕСНОЙ ВОДЫ И УГЛЕКИСЛОТЫ, УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ

На ИК-спектрах пластин кварца месторождений различных генетических типов и рудных формаций наиболее отчетливо варьируют параметры трех групп полос поглощения: в области 2100—2300 (обертоны собственных колебаний решетки), 2360—2390 (примесь углекислоты) и 3300—3800 (OH_X-группы) $см^{-1}$.

ИК-спектры различных частей кристаллов и агрегатов. ИК-спектры кристаллов и зернистых агрегатов существенно различаются по степени разрешенности многих полос поглощения, прежде всего в области 3200—3600 $см^{-1}$. Это же относится и к спектрам различных частей кристаллов кварца. Обычно на слаборазрешенных спектрах оснований кристаллов наблюдались полосы 3340 $см^{-1}$ (OH—Al-связи), 3400 $см^{-1}$ (адсорбированные молекулы воды). ИК-спектры зоны призм всегда имеют полосы поглощения 3510—3490 $см^{-1}$ (молекулы воды в дефект-каналах и адсорбированные поверхностью микротрещин), 3395—3385 $см^{-1}$ (валентные и трансляционные колебания воды); 3330—3315 $см^{-1}$ (основные колебания молекулярной воды). ИК-спектры головок бесцветных кристаллов золоторудных месторождений характеризуются полосами поглощения 3505—3510 и 3380—3390 $см^{-1}$, обусловленными присутствием лития, а также полосами 3340 $см^{-1}$, связанными с примесью алюминия. Головки дымчатых кристаллов дают ИК-спектры с полосами 3200 $см^{-1}$ (обертоны или комбинационные колебания решетки), 3340 и 3384 $см^{-1}$ (OH—Al-связи) и 3400, 3450 и 3520 $см^{-1}$ (OH—Na-связи). ИК-спектры аметистов и аметистовидного кварца близповерхностных месторождений имеют полосы поглощения 3486, 3400 $см^{-1}$ (адсорбированные молекулы воды), 3395—3390 $см^{-1}$ (OH—Li-связи). На ИК-спектрах аметистов железорудных месторождений отмечаются полосы 3585, 3485, 3430, 3384 $см^{-1}$.

Как показано В.В. Букановым [7], кристаллы кварца различного габитуса их хрусталеносных месторождений отличаются и по ИК-спектрам. Призматические дымчатые кристаллы и окрашивающийся в дымчатый цвет при облучении горный хрусталь имеют спектры со слабыми полосами 3200, 3300 и 3384 $см^{-1}$, из которых две первые обусловлены обертонами и комбинационными частотами собственных колебаний решетки, а последняя — дефектами, обусловленными примесью алюминия и щелочных металлов или протонами, ассоциирующим с гидроокислом. Спектры кристаллов тригонально-призматического габитуса дополняются полосами с частотами 3440, 3487, 3510 $см^{-1}$. Самые интенсивные полосы 3384 и 3487 $см^{-1}$ связаны здесь соответственно с OH—Al- и OH—Li-дефектами. При облуче-

нии такие кристаллы становятся дымчато-цитриновыми. Не окрашивающиеся при облучении кристаллы имеют спектр с тремя полосами 3487, 3384 и 3200 $см^{-1}$, связанными с Al—OH и Li—OH-дефектами. Нередко отмечается также и полоса 3400 $см^{-1}$ в дублете с 3600 $см^{-1}$, обусловленная OH—H^+-связью. Интенсивности полос поглощения на спектрах радиационно устойчивых кристаллов невелики.

Максимальная интенсивность полос поглощения с частотой 3487 $см^{-1}$ характерна для участков кристаллов, сложенных пирамидами нарастания ромбоэдров. Отмечено увеличение интенсивности полос поглощения 3384—3395 $см^{-1}$ в приграненных и реберных частях зоны призмы, а также в участках пирамид роста граней с большей скоростью роста. Это наблюдение [7] подтверждается на кристаллах кварца золоторудных месторождений. С этой же особенностью захвата примесей при быстром росте или образовании индивидов связаны и необычно большие интенсивности плохо разрешенных полос поглощения в области 3400 $см^{-1}$ на ИК-спектрах халцедонов.

Разрешенность полосы в области 3 мкм зависит от степени совершенства кристаллического строения различных частей сложных агрегатов: мелкозернистые их части имеют размытый спектр, а грубозернистые и друзовидные агрегаты — более разрешенный.

В табл. 20 показана зависимость интенсивности полос поглощения ИК-спектров отдельных частей ритмично-слоистых агрегатов кварца близповерхностного золото-серебряного месторождения от их структурно-текстурных особенностей и времени образования. Образец состоял из семи слоев, пачки которых (1—3 и 7—4) образованы в результате близкоодновременного встречного роста.

Полоса 3432 $см^{-1}$, характеризующая Si—OH—OH_x-связи, свойственные, как будет показано ниже, только кварцу малоглубинных месторождений, имеет максимумы интенсивности на ИК-спектрах ранних (в каждом из ритмов, которых в пачке 7—4 имеется два) массивных агрегатов и минимумы — поздних тонкошестоватых. Это же относится и к интенсивности полос, характеризующих концентрации углекислоты. Интенсивности и четкость полос поглощения с частотами 2226 и 2125 $см^{-1}$, связанных с обертонами собственных колебаний решетки, в направлении нарастания слоев также возрастают, свидетельствуя о повышении степени совершенства структуры в поздних образованиях по сравнению с ранними.

В связи с тем, что концентрации примесей щелочей и алюминия, которые фиксируются появлением определенных полос и поглощения на ИК-спектрах, являются показателями pH среды и скорости роста, форма и интенсивность ИК-спектров могут явиться типоморфными признаками условий образования кристаллов и зернистых агрегатов кварца.

ИК-спектры жильного кварца из месторождений различных рудных формаций. Поскольку условия образования кварцевых жил определяют состав и свойства слагающего жильного кварца, предпринято сопоставление ИК-спектров кварца различных групп месторождений. Результаты сопоставления по частотам полос поглощения в области 3 мкм приведены ниже.

Таблица 20

Изменчивость интенсивности полос поглощения на ИК-спектрах кварца ритмично-слоистого агрегата

Номер слоя	Строение слоя	OH_x-группы	CO_2	Обертоны собственных колебаний		Направление нарастания слоев
		3432 $см^{-1}$	2356 $см^{-1}$	2226 $см^{-1}$	2125 $см^{-1}$	
1	Массивный	0,925	0,067	0,209	0,088	
2	Массивный, микропластинчатый	0,917	0,064	0,221	0,094	
3	Тонкошестоватый	0,901	0,058	0,222	0,094	
4	Тонкошестоватый	0,879	0,063	0,284	0,101	Поздний ритм
5	Массивный	0,952	0,066	0,200	0,090	
6	Тонкошестоватый, массивный	0,881	0,069	0,196	0,075	Ранний ритм
7	Массивно-слоистый	0,921	0,075	0,169	0,066	

Типичные полосы поглощения, не обнаруженные у кварца месторождений других генетических типов и рудных формаций, характерны: для параморфоз по β-кварцу (3638, 3470 $см^{-1}$, . обусловленные, вероятно, связями гидроксила с литием и фтором [3]); для кварца из месторождений грейзеновой касситерит-вольфрамит-кварцевой формации (3692 $см^{-1}$, природа неясна); для кварца месторождений, переходных от среднеглубинных к малоглубинным золото-серебряным (3586—3581, 3681 $см^{-1}$), а также для кварца типичных малоглубинных золото-серебряных месторождений (3432 и 3440 $см^{-1}$). Природа этих специфичных полос поглощения связана вероятно, с особыми дефектами структуры и составом кварца, образованного в близповерхностных условиях с быстро изменяющимися термодинамическими параметрами минералообразующей среды.

Ранее нами были подмечены [43] вариации частот полос поглощения в областях 2190—2270 и 2098—2180 $см^{-1}$. На основании обработки ИК-спектров кварца трех десятков рудных полей и месторождений удалось выявить, что изменчивость указанных частот имеет определенные пределы, характерные для кварца определенных генетических типов и рудных формаций (рис. 44). Совершенно отчетливо выделяется кварц блоковых зон пегматитов (2190—2194 $см^{-1}$), грейзенов (2223—2225 $см^{-1}$), глубинных и переходных к средне-

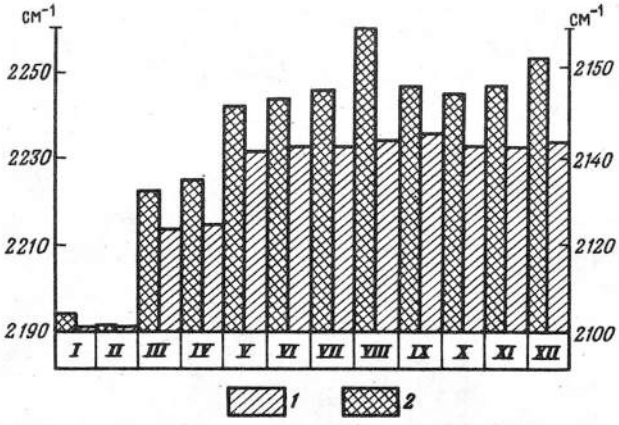


Рис. 44. Усредненные значения обертонов собственных колебаний решетки кварца месторождений различных генетических типов и рудных формаций.

Пегматиты: *I* — параморфоза α-кварца по β-кварцу (Волынь), *II* — α-кварц (Адун-Челон); грейзены: *III* — касситерит-силикатные, *IV* — кварц-вольфрамитовые; гидротермальные месторождения: *V* — глубинные золото-сульфидно-кварцевые; среднеглубинные: *VI* — золото-кварцевые убогосульфидные, *VII* — то же, жильные зоны и штокверки, *VIII* — золото-кварц-сульфидно-актинолит-магнетитовые; малоглубинные: *IX* — переходные к малоглубинным золото-серебряным (Au/Ag $< 0{,}1$), *X* — наиболее глубинные из малоглубинных золото-серебряных сульфидно-адуляр-гидрослюдисто-кварцевые, *XI* — оловянно-золото-серебряные адуляр-кварцевые, *XII* — типичное золото-серебряное адуляр-каолинит-кварцевое (Балейское рудное поле). Области частот: *1* — 2098—2180 $см^{-1}$, *2* — 2190—2270 $см^{-1}$

глубинным золоторудных (2242 $см^{-1}$), среднеглубинных золоторудных убогосульфидных (2243 $см^{-1}$) и малоглубинных золото-серебряных (2245—2253 $см^{-1}$) месторождений. При этом во всех группах рудных формаций происходит нарастание этого параметра ИК-спектров кварца с уменьшением глубины образования. Кварц золото-серебряного месторождения, по условиям образования весьма близкого к среднеглубинным, имеет ту же среднюю величину частоты полосы поглощения, что и жильные зоны и штокверки месторождений среднеглубинных формаций. Для средних значений частот поглощения полосы 2098—2143 $см^{-1}$ также намечается выявленная тенденция. Не вписывается в выявленную закономерность кварц золото-кварц-сульфидно-актинолит-магнетитового месторождения, что связано, по-видимому, с особыми условиями его формирования.

Смещение рассматриваемых полос поглощения в длинноволновую область у кварца малоглубинных формаций по сравнению с глубинными свидетельствует об уменьшении упорядоченности его структуры в близповерхностных месторождениях.

Таблица 21

Концентрации углекислоты и воды в кварце средне- и малоглубинных золоторудных месторождений

Формационный тип месторождения	CO_2			H_2O			H_2O/CO_2
	n	$\bar{x}$	σ_n	n	$\bar{x}$	σ_n	
Переходное к глубинным золото-кварц-сульфидно-магнетитовое	26	0,611	0,184	26	0,761	0,254	1,245
Среднеглубинные:							
золото-сульфидно-кварцевые	32	0,705	0,178	32	0,951	0,223	1,35
золото-кварцевые умеренносульфидные	128	0,498	0,23	133	0,969	0,294	1,95
золото-кварцевые убогосульфидные	195	0,596	0,238	193	1,037	0,303	1,74
Малоглубинные золото-серебряные:							
типичное золото-серебряное адуляр-каолинит-кварцевое	261	0,102	0,08	264	1,146	0,625	11,23
олово-золото-серебряное адуляр-кварцевое	79	0,063	0,013	79	1,376	0,7	21,84

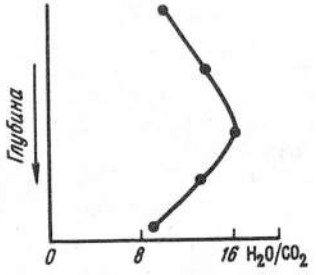


Рис. 45. Изменение соотношения концентраций воды и углекислоты в жильном кварце в зависимости от глубины образования (усредненные данные по трем рудным полям)

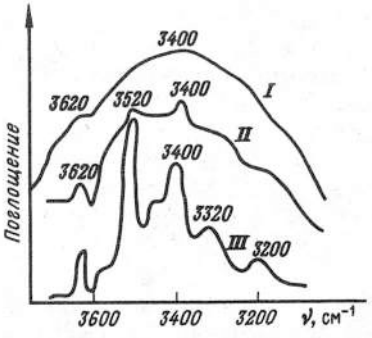


Рис. 46. Разрешенность спектров поглощения кварца различной степени кристалличности.

I — кварц балейского типа; *II* — поликристаллические агрегаты кварца среднеглубинных золоторудных и оловянно-вольфрамовых месторождений; *III* — монокристаллы из пегматитов и кварц-вольфрамитовых жил

Для шести групп образцов кварца, представляющих различные формационные типы золоторудных месторождений, по интенсивности полос поглощения на ИК-спектрах 2360—2390 $см^{-1}$ и в области 3200—3600 $см^{-1}$ рассчитаны величины концентраций углекислоты (K_3) и OH_x-групп (K_4). Как видно из табл. 21, существуют довольно четкие тенденции уменьшения концентраций углекислоты и увеличения концентраций OH_x-групп с уменьшением глубины формирования месторождений. Одновременно наблюдается в принципе однонаправленное возрастание отношения концентраций воды и углекислоты. Полученные величины могут быть надежными типоморфными признаками для рудноформационного анализа.

В пределах рудной зоны Балейского рудного поля, как и на других рудных полях малоглубинной золото-серебряной формации, по данным интерпретации ИК-спектров кварца устанавливается, что соотношение концентраций воды и углекислоты имеет тенденцию к концентрической зональности (рис. 45). Во всех частях жил в кварце преобладают OH_x-группы. В срединных, наиболее продуктивных частях жил относительные их количества возрастают за счет более длительного процесса кристаллизации и обособления углекислоты от воды и кремнезема. С глубиной относительные концентрации OH_x-групп в кварце вновь уменьшаются, а CO_2 — возрастают, вероятно, за счет увеличения общего давления в системе.

Одним из важнейших типоморфных признаков жильного кварца является сама форма ИК-спектров в области поглощения OH_x-групп, позволяющая надежно различать кварц малоглубинных, среднеглубинных и поликристаллических друзоватых агрегатов или отдельных кристаллов (рис. 46). Кроме того, как уже отмечалось, полосы

поглощения в области 3500 $см^{-1}$ и более связаны с Li—OH-дефектами, а также с невыясненными формами вхождения фтора и OH_x-групп.

СОВЕРШЕНСТВО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ КВАРЦА КАК ТИПОМОРФНЫЙ ПРИЗНАК УСЛОВИЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И РУДНОФОРМАЦИОННОЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Совершенство кристаллического строения (СКС) кварца варьирует достаточно широко как в пределах отдельных кристаллов и агрегатов, так и месторождений.

Изменчивость СКС в кристаллах и агрегатах. Для отдельных частей кристаллов, массивного или друзовидного кварца, служащего им субстратом, устанавливается возрастание СКС от субстрата до головки кристалла (табл. 22) на фоне уменьшения температуры кристаллизации.

Таблица 22

Изменчивость СКС последовательно образованных частей агрегатов и кристаллов кварца

Характеристика образца	СКС	Газовая фаза, %	Температура гомогенизации, °С
Массивный грубозернистый, участками друзовидный	92,5	22—55 / 36	260—325 / 305
Основание кристаллов	101,6	25—45 / 35	260—360 / 300
Прозрачные части кристаллов	103,9	12—40 / 21	200—270 / 234

Примечание. В третьей и четвертой графах таблицы указан размах значений, в знаменателе — среднее значение.

Подобная же картина получена и для последовательно образованных структурно-текстурных разностей существенно кварцевых агрегатов в рудной зоне Балейского рудного поля. Рассчитанные отклонения объемов элементарной ячейки (ΔV) от стандарта (кварц месторождения Кожим, $V = 0{,}112956$ $нм^3$ [23]) уменьшаются по мере возрастания СКС. Это свидетельствует о рыхлости структуры ранных генераций кварца и постепенном упорядочивании поздних. Возрастание СКС происходит в сложно построенных ритмично-слоистых агрегатах на фоне уменьшения температуры минералообразования и содержания газовой фазы во включениях (рис. 47). Полученные закономерности подтверждены в результате обработки данных по

всей совокупности проб Балейского рудного поля. Группы главных структурно-текстурных разностей существенно кварцевых агрегатов, последовательность образования которых на месторождении в целом выдерживается, по средним значениям СКС и ΔV выстроились в генетической последовательности (табл. 23).

Изменчивость СКС с глубиной. На месторождениях среднеглубинных и малоглубинных рудных формаций прослежено изменение СКС кварца с глубиной (табл. 24, 25).

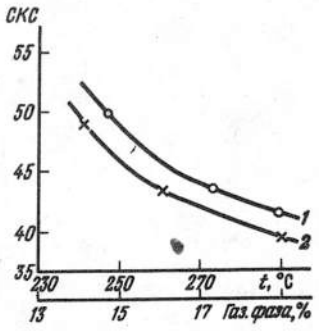


Рис. 47. Зависимость СКС кварца от температуры гомогенизации газово-жидких включений (кривая *1*) и объема газовой фазы в них (кривая *2*)

Обнаруживается общая тенденция увеличения СКС с глубиной. Но она осложнена довольно четким увеличением ее в срединных частях жил. Для среднеглубинного месторождения в этой части жилы установлен один из максимумов содержания золота. Здесь же распространены друзовидные текстуры. В жиле Главной малоглубинного месторождения выявленная тенденция нарушается вследствие того, что в срединной части жилы широко развиты агрегаты относительно хорошо раскристаллизованного кварца, в том числе аметистовидного. Подобные закономерности присущи и кварцу Балейского рудного поля: на фоне общего возрастания СКС от 29,7 на верхних горизонтах до 31,5—32,5 на нижних в средней части рудной зоны Балейского рудного поля наблюдается увеличение его значения до 31—41. Данные по СКС убеждают в том, что кристаллизация шла в направлении от периферии жилы (сверху и с флангов) к центру и на глубину. Высокие значения СКС чаще развиты там, где мощность жилы больше, — в ее срединной части.

СКС кварца в месторождениях различных рудных формаций. Исследования СКС кварца пегматитов, грейзенов с кварц-вольфрамитовыми жилами, золоторудных месторождений различных фаций глубинности, флюоритовых месторождений, а также халцедонов миндалекаменных пород (табл. 26) показали, что эта величина уменьшается от пегматитов к грейзенам (от 104,7 до 65,5) и от глубинных золоторудных месторождений к малоглубинным (от 89,2 до 33,6). При этом различия в глубине образования золоторудных жил и менее глубинных жильных зон и штокверков убогосульфидных золото-кварцевых месторождений также отчетливо фиксируются изменением СКС соответственно от 73,7 до 54,8.

Минимальные величины СКС ($\bar{x}$ = 24) присущи халцедону миндалин. Примечательно, что увеличение СКС от ранних генераций

Таблица 23

СКС кварца различных агрегатов

Структурно-текстурная разновидность кварца	СКС			ΔV, нм^3
	n	$\bar{x}$	σ_n	
Полосчатый	123	29,9	2,43	0,000225
Массивный	91	30,7	2,43	0,000209
Пластинчатый, массивно-пластинчатый	69	33,4	4,55	0,000198
Шестоватый и гребенчатый	52	36,7	7,2	0,000101

Таблица 24

Изменчивость с глубиной СКС кварца из жил среднеглубинного золото-кварцевого месторождения

Относительная отметка, м	СКС		
	n	$\bar{x}$	σ_n
975—1005	2	65,2	—
782	7	81,4	10,7
704—708	19	84,5	8,9
670—693	7	85,7	4,0
554	16	85,4	9,0
454	7	81,6	5,3

Таблица 25

Изменчивость с глубиной СКС кварца из жил малоглубинного месторождения

Глубина, м	СКС			Примечания
	n	$\bar{x}$	σ_n	
60	21	35,8	3,3	Преимущественно полосчатые и массивно-полосчатые агрегаты
110	22	37,7	5,1	Массивные и массивно-полосчатые агрегаты
160	13	42,0	6,0	Срединная часть жилы, широко развиты массивные и массивно-шестоватые агрегаты
210	11	34,8	3,2	Преимущественно полосчатые агрегаты
310	6	39,4	7,0	Массивные агрегаты
Среднее по жиле	73	37,8	4,9	

Таблица 26

СКС жильного кварца из месторождений различных рудных формаций

Генетический тип месторождений, рудная формация	СКС		
	n	$\bar{x}$	σ_n
Пегматиты			
Камерные; кристаллы	4	104,7	4,9
Редкометальные; блоковая зона	5	74,4	11,8
Грейзены			
Кварц-вольфрамитовые	17	65,5	13
Гидротермальные			
Глубинные золото-кварцевые	54	89,2	14
Среднеглубинные золото-кварцевые убогосульфидные, переходные к глубинным	29	83,3	8
Среднеглубинные золото-тетрадимит-кварцевые убогосульфидные, переходные к умеренносульфидным; зернистые агрегаты	79	79,4	8,8
Среднеглубинные убогосульфидные золото-кварцевые из жильных зон и штокверков	180	54,8	9,9
То же, из жил	19	73,7	12,2
Малоглубинные золото-серебряные	385	33,6	6,7
Малоглубинные кварц-флюоритовые	7	54,4	12,3
Из миндалекаменных пород:			
халцедон	3	24	2,9
зернистый кварц	4	49,7	27,2
головки кристаллов	6	79,3	18,2

Таблица 27

СКС кристаллов кварца из месторождений разной глубины формирования

Генетический тип месторождений, рудная формация	Глубина формирования, м	СКС		
		n	$\bar{x}$	σ_n
Камерные пегматиты	3000—3500	4	104,7	5,6
Гидротермальные				
Глубинные золото-кварцевые	2500—3500	22	103	4,5
Среднеглубинные золото-кварцевые убогосульфидные	1500—3000	15	95,7	3,7
Малоглубинные, переходные к среднеглубинным золото-серебряным	600—1500	2	73,5	2,5
Типичные малоглубинные золото-серебряные (Балейское рудное поле)	200—800	8	61,8	4,3
Малоглубинные кварц-флюоритовые	200—800	7	61,2	6,5
Жеоды и жилы в базальтах, головки кристаллов	100—400	6	79,3	18,2

кварца к поздним видно и из сопоставления СКС раннего халцедона миндалин и поздних головок образовавшихся здесь же кристаллов.

Прямая зависимость СКС от глубины формирования месторождений особенно четко проявляется при изучении кристаллов (табл. 27). Повышение СКС отдельных кристаллов в жеодах связано, вероятно, с особыми условиями кристаллизации — невысокие пересыщения растворов, хорошая герметичность системы и медленное изменение температуры.

СКС как новый типоморфный признак кварца. Приведенный выше материал показывает, что величина СКС имеет устойчивые пределы вариаций, а средние значения ее для месторождений определенных генетических типов и рудных формаций являются одним из критериев для оценки фаций глубинности, выделения генераций кварца и т. д. Это позволяет считать величину степени СКС новым типоморфным признаком минералов. Особо следует отметить, что СКС связано с изменчивостью объема элементарной ячейки и является одним из фундаментальных признаков совершенства структуры минерала.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КВАРЦА

Выполненное в последние годы комплексное изучение электрических свойств кварца позволило выявить закономерное изменение некоторых из них в образцах из разных месторождений.

Величина пьезомодуля. Пьезомодуль кварца оловорудных (данные Е.И. Доломановой и А.Б. Успенской) и золоторудных (данные О.И. Широкого, Е.В. Смеховой и др.) месторождений варьирует в зависимости от принадлежности месторождения к определенной рудной формации и увязывается с величинами СКС (табл. 28). Минимальные значения этой величины среди образцов кварца оловорудных месторождений имеют поздние гребенчатые агрегаты.

Пьезомодули кварца золоторудных месторождений возрастают в ряду формаций от малоглубинных к глубинным. Эти особенности находятся в соответствии с представлениями о возрастании совершенства кристаллического строения, об увеличении размеров индивидов и упорядоченности их распределения в минеральных агрегатах. Последнее видно из табл 28, где показано однонаправленное возрастание с глубиной пьезомодуля и СКС одних и тех же образцов.

Величина пьезомодуля увеличивается с глубиной и в пределах кварцевых жил отдельных месторождений (рис. 48).

Величины пьезомодулей, равно как и характер пьезотекстур, будучи количественным отображением упорядоченности индивидов в мелкозернистых или кристаллически-зернистых агрегатах, являются важными типоморфными и поисковыми признаками рудоносности кварца и могут быть основой для разработки критериев оценки кварцевых жил и их отвалов [49].

Диэлектрическая проницаемость. Наиболее информативными для установления рудноформационной принадлежности жильного

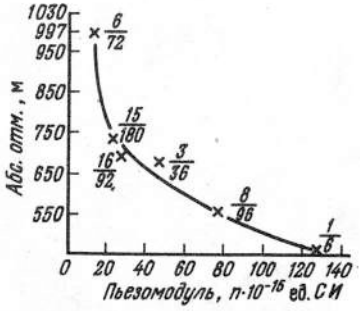


Рис. 48. Изменение с глубиной величины пьезомодуля жильного кварца.

В числителе — число образцов, в знаменателе — число определений пьезомодуля

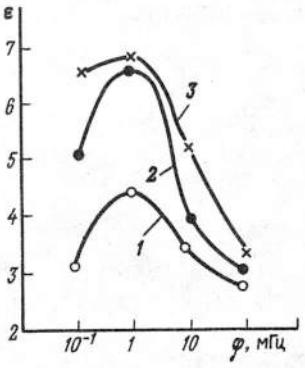


Рис. 49. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости кварца различной текстуры.

1 — тонкополосчатый; *2* — массивный; *3* — пластинчатый

кварца и отношения его к продуктивному являются кривые частотной зависимости ДП, которые значительно отличаются от теоретических.

Формы кривых варьируют для проб из разных частей агрегатов, имеющих сложное строение (рис. 49). ДП возрастает от тонкополосчатых агрегатов к пластинчатым. В целом для всех структурно-текстурных разновидностей агрегатов характерно возрастание ДП при изменении частоты от 100 кГц до 1 МГц, а затем быстрое уменьшение при дальнейшем возрастании частоты до 100 МГц.

Определенные различия наблюдаются и при анализе обобщенных кривых (от 20 до 165 проб для каждого рудноформационного типа) частотной зависимости ДП кварца месторождений различных рудных формаций (рис. 50). Различаются также эти кривые для жильного кварца разной золотоносности (рис. 51).

Почти все образцы продуктивного кварца месторождений малоглубинной формации характеризуются относительно резким увеличением ДП на частоте 100 МГц по отношению к таковой на частоте 10 МГц. Относительное возрастание ДП при увеличении частоты представляет общеизвестную в физике закономерность, а более четкие изменения ее в золотоносном кварце отражают лишь бóльшую его дефектность по сравнению со слабозолотоносным, не претерпевшим значительных изменений.

Особенно важным оказалось закономерное возрастание величины ДП для определенных частот с глубиной, например, в Балейском рудном поле [22]. Подобная зависимость от глубины получена и для кварца одного из среднеглубинных золоторудных месторождений Забайкалья (табл. 29).

Таблица 28

Изменчивость пьезомодуля и СКС агрегатов кварца месторождений различных рудных формаций

Рудная формация и стадии минерализации	Пьезомодуль			СКС			Единицы измерения пьезомодуля
	n	$\bar{x}$	размах	n	$\bar{x}$	размах	
Касситерит-полевошпатово-кварцевая, первая стадия			5,5—3,8				% от пьезомодуля x-среза эталона кварца
Касситерит-кварцевая, первая стадия			5—53,6				То же
Гребенчатый безрудный кварц тех же формаций			1,5—2				—"—
Глубинная золото-кварцевая	1	171,60		26	89	73—99	$n \cdot 10^{-15}$ (ед. СИ)
Среднеглубинная:							
переходная к глубинным золото-сульфидно-кварцевая	15	116,00	28,3—255,09	11	84	64—99	$n \cdot 10^{-15}$ (ед. СИ)
типичная среднеглубинная золото-кварцевая убогосульфидная	55	38,28	3,3—173,25	12	73	44—83	$n \cdot 10^{-15}$ (ед. СИ)
менее глубинная золото-кварцевая	22	11,55	3,96—29,04	12	72	47—93	$n \cdot 10^{-15}$ (ед. СИ)
Малоглубинная золото-серебряная	45	0,83	0,66—4,62	57	34,0	28—52	$n \cdot 10^{-15}$ (ед. СИ)

При этом, как и для величины СКС, на фоне общего возрастания ДП с глубиной для частот 10 и 100 МГц наблюдается определенная зональность с минимумом на уровне 750—700 м. Характерно, что на этом месторождении примерно так же ведет себя с глубиной изменчивость ЕТЛ: на фоне общей тенденции увеличения с глубиной именно на интервале 750—700 м происходит резкое ее уменьшение. Эта особенность объясняется тем, что ЕТЛ и величина ДП находятся в зависимости от концентраций ЭДЦ в кварце. В частности, В.В. Букановым [7] для кристаллов месторождений горного хрусталя Полярного Урала получена зависимость между величиной ДП (ϵ) и суммой атомов примесей (ΣN_i), которая выражается уравнением $\epsilon = 4{,}639 - 0{,}000021\ \Sigma N_i \pm 0{,}016$.

Рис. 50. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости кварца месторождений различных генетических типов и рудных формаций.

1 — граниты; *2* — пегматиты; *3* — грейзены кварц-вольфрамитовой и касситерит-силикатной формаций; гидротермальные: *4* — глубинные и среднеглубинные золото-кварцевые; *5* — среднеглубинные золото-сульфидно-кварцевые; *6* — переходные от среднеглубинных к малоглубинным золото-серебряным; *7* — малоглубинное серебряно-золото-теллуридное; *8* — типичное малоглубинное золото-серебряное

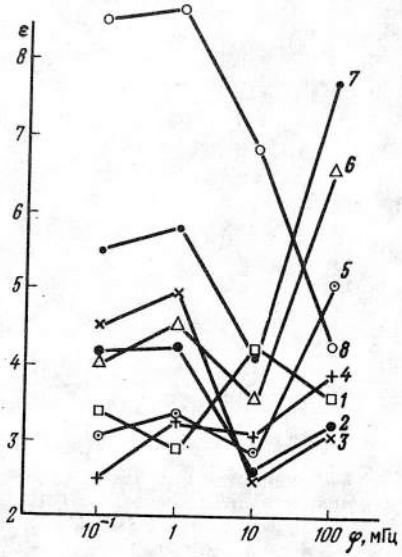


Рис. 51. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости кварца разной золотоносности.

1 — слабозолотоносный; *2* — с высоким содержанием золота; *3* — безрудный, из гранита

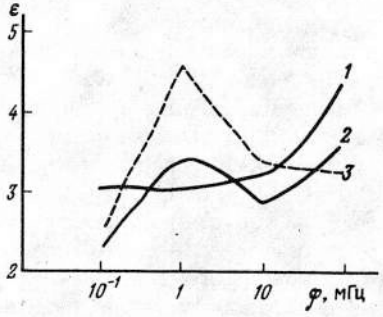


Таблица 29

Изменчивость диэлектрической проницаемости жильного кварца с глубиной

Отн. отметка, м	Число проб	Диэлектрическая проницаемость при частоте		
		10^{-2} МГц	10 МГц	100 МГц
1020—975	2	2,22	2,97	3,45
750—725	4	2,70	1,65	2,72
706—702	11	3,00	2,71	3,34
686—672	3	3,38	4,72	3,97
555	6	3,39	4,06	5,94

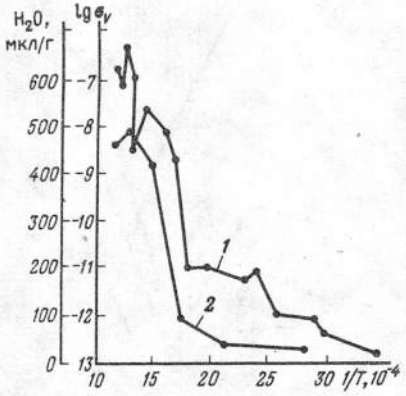


Рис. 52. Температурные зависимости электропроводности кварца (кривая *1*) и количества воды (кривая *2*), выделившейся из него при нагревании

Для кварца Балейского рудного поля в выборке из 165 образцов получен коэффициент корреляции $tg\sigma$ при частоте 100 кГц с концентрациями лития, равный 0,73, при уровне значимости 2,1.

Электропроводность при нагревании. Изменение электропроводности кварца при нагревании стало изучаться сравнительно недавно [22, 31 и др.]. К настоящему времени главные особенности механизма электропроводности кварца уже выяснены.

Основным инструментом выяснения механизма проводимости диэлектриков служат экспериментальные кривые $\lg\sigma_V = f(T^{-1})$ (рис. 52). Необходимо также учитывать влияние химического состава и структуры на величину проводимости. В результате обработки кривых $\lg\sigma_V = f(T^{-1})$, данных химического, спектрального и рентгеноструктурного анализов установлено [22, 43, 49]:

1) величина удельной проводимости поликристаллов по сравнению с монокристаллами выше;

2) энергия активации зарядоносителей изменяется от 0,69 до 0,81 эВ. Столь низкое значение энергии активации можно объяснить примесным характером проводимости;

3) величина и интенсивность роста удельной проводимости зависят от суммарного содержания примесей Na^+, K^+, Li^+, OH^-. Более интенсивно происходит ее изменение с повышением температуры;

4) вблизи 573 °С (точка $\alpha-\beta$-перехода) наблюдается излом кривых $\lg\sigma_V = f(T^{-1})$;

5) на равномерность изменения проводимости природного кварца с нагреванием существенно влияют газово-жидкие включения.

Наиболее характерные резкие изменения проводимости наблюдаются в интервалах температур: вблизи 120, 300—400, 530—600 °С. Указанные интервалы температур достаточно определены для большинства исследованных нами природных кристаллов и агрегатов кварца и могут быть объяснены протекающими в них процессами. В интервале 100—150 °С происходит удаление адсорбированной и поровой влаги межзернового пространства, наличие которой вполне определенно обнаруживается на ИК-спектрах широкой полосой поглощения в области 3450 $см^{-1}$. Интенсивность последней по мере нагревания уменьшается.

По данным химических анализов водных вытяжек газово-жидкие включения содержат ионы Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^- и другие компоненты. Гомогенизация и разрыв газово-жидких включений происходят в интервале 250—420 °С. Можно с уверенностью связать локальное возрастание электропроводности в этом интервале с резким увеличением числа зарядоносителей.

Изменение электропроводности в интервале 530—600 °С можно объяснить разрывом связей при перестройке структуры кварца во время $\alpha-\beta$-перехода. Последней в исследуемых кварцах осуществляется не строго при 573 °С, а варьирует от 548 до 584 °С. Примеси OH^-, K^+, Na^+, Li^+, будучи слабо связаны с решеткой, при нагревании в электрическом поле способны мигрировать по структурным каналам в кварце, становясь носителями зарядов. Сопоставление кривых изменения электропроводности кварца и динамики выделения из него воды подтверждает правомерность изложенного (см. рис. 52).

При изучении жильного кварца различной текстуры Балейского рудного поля оказалось, что электропроводность нарастает в ряду: полосчатые — полосчато-массивные — массивные — пластинчатые (табл. 30). Это обусловлено тем, что наибольшая степень кристалличности и содержание способных к разрыву газово-жидких включений возрастают в этом направлении. При этом начало возрастания электропроводности при нагревании у пластинчатых и массивных агрегатов кварца наступает раньше, чем у полосчатых в связи с тем, что сначала из флюида выделяются более высокотемпературные полосчатые, а затем уже из более разбавленных и относительно низкотемпературных растворов, ближе к концу процесса кристаллизации, выделяются пластинчатые.

В общем случае электропроводность кварца изменяется и с глубиной, так как относительное количество массивных и пластинчатых агрегатов увеличивается в этом направлении.

Таким образом, вариации электропроводности жильного кварца различной текстуры Балейского рудного поля зависят от условий и способа его образования и являются типоморфными.

Подобные же тенденции выявлены и на месторождении среднеглубинной формации [49]. Удельная электропроводность кварца изменяется от 0,01132 до 0,2766 $\cdot 10^{-1}$ $ом^{-1}$ $см^{-1}$ (более чем в 20 раз) при температуре 20 °С, а при нагревании в вакууме до 700 °С она возрастает до 28,3 — 53,21 $\cdot$ 10^{-10} $ом^{-1}$ $см^{-1}$ у различных образцов. Причинами таких широких вариаций электропроводности кварца могут быть различные соотношения количеств и форм примесной воды, а также примеси щелочных металлов, что в действительности и наблюдается в кварце этого месторождения. Резкое увеличение электропроводности зафиксировано при температурах, сопоставимых с температурами гомогенизации газово-жидких включений, и в целом она возрастает с глубиной (табл. 31), хотя и с отклонениями. Эти отклонения обусловлены различными соотношениями количеств и температур разрыва не только первичных, но и более низкотемпе-

Таблица 30

Удельная электропроводность важнейших структурно-текстурных разновидностей жильного кварца при различных температурах

Структурно-текстурная разновидность кварца	Удельная электропроводность при температуре, $ом^{-1}$ $см^{-1}$		
	20 °С	377 °С	573 °С
Полосчатый, полосчато-массивный (28 проб)	$6{,}2 \cdot 10^{-12}$	$964 \cdot 10^{-12}$	$1083 \cdot 10^{-12}$
Массивный (11 проб)	$8{,}75 \cdot 10^{-12}$	$1200 \cdot 10^{-12}$	$6505 \cdot 10^{-12}$
Пластинчатый, массивно-мелкодрузовидный, мелкогребенчатый (12 проб)	$2266 \cdot 10^{-12}$	$2900 \cdot 10^{-12}$	$9320 \cdot 10^{-12}$

Таблица 31

Удельная электропроводность жильного кварца из месторождения золото-сульфидно-кварцевой среднеглубинной формации на разных глубинах

Абс. отметка, м	Число проб	Средняя температура интенсивного возрастания электропроводности, °С	Удельная электропроводность (10^{-12} $ом^{-1}$ $см^{-1}$) при температуре	
			400 °С	600 °С
750—725	2	280	47	1900
704	5	300	18	861
555	4	384	4	107
470	2	311	18	715

ратурных вторичных газово-жидких включений, а также соотношениями в них газовой и жидкой фаз, по-разному влияющих на электропроводность. Весьма характерно общее уменьшение электропроводности при температурах 400 °С (надкритическое состояние воды) и 600 °С (область $\alpha-\beta$-переходов) с глубиной. Эта особенность указывает на уменьшение количества воды в кварце, образовавшемся на бóльших глубинах и при бóльших температурах. Значительные изменения электропроводности в области температур, близких к 600 °С, связаны с выходом воды и примесей щелочей при $\alpha-\beta$-переходе, как это было показано нами для кварца пегматитов Волыни [43] и Балейского рудного поля [22].

Таким образом, электропроводность агрегатов кварца зависит от условий их кристаллизации.

ПАРАМЕТРЫ $\alpha-\beta$-ПЕРЕХОДОВ КАК ТИПОМОРФНЫЙ ПРИЗНАК

О механизме $\alpha-\beta$-превращения. Суть $\alpha-\beta$-перехода в кварце заключается в том, что вблизи точки перехода (~ 573 °С) происходит резкое ослабление связей за счет воздействия тепла. При этом тригональная решетка приходит в состояние неустойчивости по отношению к тепловому воздействию, и для того, чтобы сохранить стабильность постройки из кремнекислородных тетраэдров, она вынуждена поглотить часть полученного тепла, увеличить свою внутреннюю энергию и стать гексагональной. Это реализуется разворотом тетраэдров вокруг оси x на 15,9 °С. При этом угол Si—O—Si становится равным 150 °. Поглощение тепла при $\alpha-\beta$-переходе составляет по [35] 1,214 кДж/моль, в реальных кристаллах оно варьирует от 0,335 до 0,942 кДж/моль.

Полиморфное превращение сопровождается резким (во времени) изменением параметров элементарной ячейки с их увеличением: a_0 на 0,0014 нм, c_0 — на 0,0053 нм; c/a изменяется от 1,0940 до 1,0923. Плотность при этом уменьшается до 2,533 г/см^3 [31]. Встречающиеся в природных условиях параморфозы α-кварца по β-кварцу имеют промежуточное значение плотности — 2,641 г/см^3 [43]. Теплота $\alpha-\beta$-превращения параморфозы составляет всего 0,624 кДж/моль.

По последним данным $\alpha-\beta$-превращение происходит не мгновенно, а в некотором интервале времени и температур. Так, по наблюдениям В.К. Семенченко и И.Т. Бондаря в 1973 г., интервал температур составляет около 0,5 °С. В это время фиксируется одновременное существование α- и β-модификаций по двум показателям преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей. О существовании двух фаз в параморфозах кварца свидетельствует и раздвоение пятен на лауэграммах [43]. На кривых ДТА также всегда фиксируется постепенное нарастание процесса превращения. Связано оно, по-видимому, с неодновременностью его протекания во всех частях образца в связи с различными дефектами, локальными центрами напряжений и т. д. Непрерывность и длительность процесса, вероятно, обусловлены неравномерным распределением примесей и дислокаций в реальных кристаллах кварца.

Зависимость температур $\alpha-\beta$-переходов от примесей. Известно, что вариации температур фазовых переходов в кварце достаточно значительны [8, 39, 43 и др.]. В общем случае температуры переходов изменяются от 536 °С для образца, богатого литием, калием и натрием, до 587,6 °С в кварце из пегматитов Волыни. По данным Е.В. Цинзерлинг, обобщившей в 1961 г. сведения о связи температуры $\alpha-\beta$-переходов с примесями, характер их влияния на температуру инверсии зависит от условий роста и форм внедрения примесей. Например, внедрение ионов лития и натрия в растущий кристалл изменяло температуру перехода от 580,1 до 582,5 °С, а содержащие эти же примеси природные образцы имели температуру инверсии 536 °С.

Таблица 32

Температура и теплота α—β-перехода последовательно образованных частей кристаллов

Часть кристалла	Параметры α—β-перехода		Температура гомогенизации газово-жидких включений, °С
	температура, °С	теплота, Дж/моль	
Основание регенерированной головки	573	712	270—280
Внутренняя часть зоны призмы	572	544—670	265—270
Головка кристалла	561—563	335—377	230
Основание кристалла	574	779	320
Головка	572	737	235—255

Можно полагать, что ионы алюминия в ассоциации с литием и натрием понижают температуру $\alpha-\beta$-перехода иногда до 550 °С и меньше, а в ассоциации с Ge, Mn, Zr и некоторыми другими — повышают (повышение температуры перехода за счет Ge показано также И.Т. Бондарем в 1975 г.). По-видимому, все зависит от типа изоморфизма — гетеровалентного в первом случае и изовалентного — во втором, который и определяет тип и силы межатомных связей и характер дефекта. Последние, вероятно, определяют и термодинамические пределы устойчивости полиморфных фаз кварца.

И.В. Булдаков и Ф. Г. Гаврюченков [8] выявили обратную корреляционную зависимость между температурой $\alpha-\beta$-перехода и параметром a_0. Основываясь на данных работ [2] и [48], они пришли к выводу о том, что на температуру инверсии преимущественно влияют Na, K, Li или Mg и Ca, входящие в решетку кварца при различных вариантах гетеровалентного изоморфизма. В результате они предположили, что необычно низкие температуры $\alpha-\beta$-перехода (до 540 ± 3 — 554 ± 3 °С) "...свойственны образцам кварца, кристаллизовавшимся в условиях повышенной скорости роста, обусловленной резким пересыщением минералообразующего раствора кремнекислотой и газовой фазой" [8, с. 57].

Параметры α — β-перехода как важный типоморфный признак. При исследовании крупных кристаллов выявлено, что в целом (табл. 32) температуры и теплоты $\alpha-\beta$-переходов уменьшаются от ранних и внутренних частей кристаллов к поздним и пригранным. Эти изменения увязываются с дефицитом нескомпенсированных зарядов при гетеровалентном изоморфизме.

Температуры $\alpha-\beta$-переходов жильного кварца Балейского рудного поля варьируют в пределах 540—571 °С. При этом в кварце последовательно образованных ритмично-слоистых агрегатов от начала их кристаллизации к концу температуры $\alpha-\beta$-переходов уменьшаются от 571 до 540 °С при изменении температур гомогенизации

газово-жидких включений в этом же направлении от 315—250 в начале кристаллизации до 150 °С в конце. Это связано с тем, что в близповерхностных условиях зарождение индивидов агрегатов кварца ранних генераций слоистой текстуры происходит очень быстро. Высокие концентрации алюминия и щелочей в силикатном флюиде способствуют быстрому связыванию их в виде неструктурных примесей слоистых силикатов (каолинит, гидрослюды)) или адуляра и захватыванию их кварцем. Неструктурные примеси неспособны существенно влиять на температуры фазовых переходов. Более поздние параллельно-шестоватые и друзовидные агрегаты кварца образуются из остаточных растворов, содержащих относительно небольшие концентрации алюминия, железа и щелочей, количество которых, как правило, недостаточно для образования собственных минеральных фаз. Поэтому они входят в кристаллическую решетку кварца, чему способствует также высокая щелочность растворов. Концентрации структурных примесей алюминия, натрия и лития в сумме достигают 0,5—1,5 %. Естественно, что такое количество примесей при гетеровалентном изоморфизме существенно влияет на силы связи в кристаллической решетке и способствует $\alpha-\beta$-переходу при низких температурах.

Выявленная изменчивость температур $\alpha-\beta$-переходов кварца в пределах отдельных участков жил в направлении от контактов к их центру, являющаяся элементом горизонтальной зональности, находит отражение и в вертикальной зональности.

Температуры $\alpha-\beta$-перехода кварца наряду с величиной СКС являются одним из важных рудноформационных признаков (табл. 33), несмотря на кажущуюся узость пределов их вариаций. Наблюдается направленное уменьшение средних значений температур $\alpha-\beta$-переходов от месторождений глубинных формаций к близповерхностным.

Как уже указывалось, при температурах, близких к области $\alpha-\beta$-перехода, из кварца выделяются вода, водород, углекислота и азот. При этом узкая полоса поглощения 3450 $см^{-1}$ на ИК-спектрах, обусловленная наличием OH—Na-дефектов, исчезала в интервале 428—575 °С и при охлаждении не восстанавливалась, а максимум выделения воды приходился на интервал 570—575 °С.

Кварц из пегматитов, по данным Е.В. Цинзерлинг, имеющий значительные примеси, обусловливающие дымчатую окраску при облучении (Алдан, Волынь, Варзоб), трудно поддается монокристаллизации и имеет температуру инверсии 577,0—587,6 °С. Хорошо монокристаллизующиеся кварцы месторождений Памира, Уральской хрусталеносной полосы и других собственно гидротермальных месторождений имеют температуры инверсии, близкие к нормальным. К. Фрондель также указал для хорошо монокристаллизующихся кварцев температуру инверсии 573,6 °С.

Весь приведенный материал, далеко не исчерпывающий проблему $\alpha-\beta$-переходов в кварце, показывает, что пределы изменчивости

Таблица 33

Температуры $\alpha-\beta$-перехода кварца из месторождений различных рудных формаций в сравнении с величинами СКС

Генетический тип месторождений, рудная формация	Температура $\alpha-\beta$-перехода			СКС $\overline{x}$
	n	$\overline{x}$	σ_n	
Пегматиты				
Камерные	5	574,0	2,3	104,7
Редкометальные	13	572,8	0,7	74,4
Грейзены				
Кварц-вольфрамитовые жилы	39	572,4	1,1	65,5
Гидротермальные				
Глубинные золото-кварцевые	23	572,0	1,1	89,2
Среднеглубинные золото-кварцевые убогосульфидные	47	569,8	1,0	79,4
Золото-кварцевые умеренно сульфидные	25	569,8	0,8	73,7
Малоглубинные олово-золото-серебряные адуляр-кварцевые	23	565,8	5,4	37,8
Малоглубинные типичные золото-серебряные адуляр-каолинит-кварцевые	140	557,2	6,9	33,6

физических параметров этого явления достаточно специфичны для кварца различного генезиса и являются его типоморфными признаками, которые могут быть использованы при изучении минеральной зональности, глубины образования и рудноформационной принадлежности кварцевых тел.

Глава IV. ТИПОМОРФНЫЕ ПРИЗНАКИ ЖИЛЬНОГО КВАРЦА КАК КРИТЕРИИ РУДНОФОРМАЦИОННОЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ И РУДОНОСНОСТИ

В предыдущей главе были приведены сравнительные данные по составу и отдельным свойствам кварца всех изученных генетических типов и рудных формаций в зависимости от последовательности выделения генераций и условий образования. Ниже рассмотрены сводные данные по типоморфизму кварца отдельных генетических типов и рудных формаций.

Оценка типоморфного признака дана по трехбалльной шкале. К важным отнесены признаки, присущие только данному типу или формации, к рядовым — признаки, близкие по численному значению еще к одной-двум рудным формациям, к второстепенным — признаки, встречающиеся у 30—50 % рудных формаций.

ТИПОМОРФНЫЕ ПРИЗНАКИ КВАРЦА ПЕГМАТИТОВ

Кварц-пегматитов (ядер и блоковых зон) резко отличается (табл. 34) по высокому алюминий-титановому отношению, содержанию ниобия, тантала, бериллия (содержится только в редкометаль-

Таблица 34

Типоморфные признаки кварца пегматитов

Параметры	$\bar{x}$	Оценка σ_n по отношению к $\bar{x}$	Оценка типоморфного признака
Al, %	0,28	>1	Рядовой
Ti, %	0,006	$\simeq 1$	”
Al/Ti	46,7	—	Важный
Na_2O, %	0,08	$>0,5$	Рядовой
K_2O, %	0,067	$\simeq 0,5$	”
Li_2O, %	0,018	$\simeq 0,3$	Второстепенный
K_2O/Na_2O	0, 8	—	Рядовой
Na_2O/Li_2O	4,4	—	Второстепенный
K_2O/Li_2O	3,7	—	”
Присутствие Nb, Ta, Sn, Be	—	—	Только в редкометальных пегматитах, важный
Ge, г/т	9	$\simeq 0,1$	Важный
Газоотделение, температура максимума, °С:			
β-кварц	500	—	”
α-кварц	300—400	—	Рядовой
H_2O, мкл/г			
β-кварц	148,7	—	Важный
α-кварц	955,3	—	Рядовой
Газовая фаза включений, %	90—35	—	Важный
ТЛ, °С:			
$T_1 - T_5$	220—250	—	”
$T_6 - T_{10}$	290—320	—	”
ИК-спектры, $см^{-1}$:			
β-кварц	3638, 3470, 2194, 2098	—	”
α-кварц	3195—3200	—	Рядовой
	2190, 2102	—	Важный
СКС:			
камерные	104,7	$<0,05$	”
редкометальные	74,4	$<0,2$	Второстепенный
$\alpha-\beta$-переходы (камерные), °С	574 ($\sigma_n > 2$)	—	Важный

ных пегматитах), германия ($\sigma_n \simeq 0,1\bar{x}$), самой высокой температуре максимума газоотделения, малой концентрации воды, большой доле газовой фазы во включениях, обычно двух-трехмаксимумной ТЛ-грамме ($T_1 - T_5$ = 220—250 °С, $T_6 - T_{10}$ = 290—320 °С), наличию на ИК-спектрах полос поглощения 3638, 3470, 2194, 2098 (β-кварц) и 3195 — 3200, 2190, 2102 (α-кварц) $см^{-1}$.

Для кварца камерных пегматитов характерны более высокие значения СКС (104,7), температур $\alpha-\beta$-переходов (574 °С), концентраций германия, а редкометальным свойственны примеси редких металлов, низкие значения СКС и температур $\alpha-\beta$-переходов.

Таблица 35

Типоморфные признаки кварца грейзеновых месторождений

Параметры	Вольфрамоносные месторождения			Оловоносные месторождения		
	$\bar{x}$	Оценка σ_n по отношению к $\bar{x}$	Оценка типоморфного признака	$\bar{x}$	Оценка σ_n по отношению к $\bar{x}$	Оценка типоморфного признака
Al, %:						
общие пробы	0,3	$\geqslant 1$	Рядовой	—	—	—
монофракции	0,203	$<0,5$	Важный	—	0, n	Рядовой
Ti, %	0,018	≈ 2	Рядовой	—	0,0 n	—"—
Al/Ti	16,6	—	—"—	—	~10	—"—
Na_2O, %	0,08	—	Второстепенный	—	—	—
K_2O, %	0,132	$\geqslant 0,5$	Важный	—	—	—
Li_2/O, %	0,002	<1	Рядовой	—	—	—
K_2O/Na_2O	1,6	—	—"—	—	—	—
Na_2O/Li_2O	40,0	—	Важный	—	—	—
K_2O/Li_2O	66, 0	—	—"—	—	—	—
As, г/т	90	$<0,5$	Рядовой	Li, Be, Sn, Nb, присутствие	—	Важный для касситерит-силикатной формации
Be, г/т	17	>3	Важный			
Bi, г/т	17	≈ 1	—"—			
W, г/т	120	$<0,5$	—"—			
Ta, г/т	29	<1	—"—			
Bi/Pb	0, 68	—	—"—			
Температура гомогенизации, °С	367 (σ_n = 49)	—	Важный для кварц-вольфрамитовой формации	362 (σ_n = 54)	—	То же
	336 (σ_n = 56)	—	Важный для кварц-вольфрамит-молибденитовой формации			
Относительные количества газовой фазы, %	38 (σ_n = 8,8)	<1	Важный для кварц-вольфрамитовой формации	39	—	—"—
	43 (σ_n = 25,9)	<1	Важный для кварц-вольфрамит-молибденитовой формации			
ТЛ, °С T_1-T_5	170—260	—	Важный	170—180	—	—
T_6-T_{10}	290—320	—	Рядовой	280—310	—	Рядовой для касситерит-силикатной формации
	290—300	—	Важный только для пегматоидного кварца полевошпато-кварц-молибденовых месторождений			
I_{1-5}/I_{6-10}	0,39	—	Важный для вольфрам-редкометальных месторождений	0,41	—	Важный для касситерит-силикатной формации
	2,44	—	Важный для кварц-вольфрамитовой формации			
	0,99	—	Важный для кварц-вольфрамит-молибденитовой формации			
	1,21	—	Важный для вольфрам-редкометальных месторождений	2,06	—	Важный для касситерит-силикатной формации
I_{6-10}/I_{11-13}	0,92	—	Важный для кварц-вольфрамитовой формации			
	1,13	—	Важный для кварц-вольфрамит-молибденитовой формации			
ИК-спектры, υ, $см^{-1}$	3572	—	Важный	3692	—	То же
	3515—3520, 2125, 2225	—	Рядовой	2223, 3400, 3572, 2124	—	Рядовой
СКС	65,2	$\leqslant 0,2$	—"—	—	—	—

ТИПОМОРФНЫЕ ПРИЗНАКИ КВАРЦА ГРЕЙЗЕНОВ

К числу важных типоморфных признаков кварца из жил вольфрамоносных грейзенов относятся (табл. 35) высокие содержания алюминия при $\sigma_n \leqslant \bar{x}$, низкое алюминий-титановое отношение, умеренные содержания щелочей и высокие величины отношений их концентраций.

Кварцу из жил вольфрамоносных грейзенов присущ типичный комплекс рудных элементов-примесей, включающий бериллий, висмут, вольфрам, тантал и мышьяк. По температурам гомогенизации газово-жидких включений и соотношению газовой и жидкой фаз обособляется кварц, относящийся к кварц-вольфрамитовой и кварц-вольфрамит-молибденовой формациям. Кварцу жил в вольфрамоносных грейзенах присуща низкотемпературная ТЛ—(T_1—T_5 = = 170—260 °С). Величины отношений температур максимумов и интенсивностей ТЛ позволяют различать грейзены с вольфрам-редкометальным, вольфрам-молибденовым и собственно вольфрамовым оруденением.

Как уже указывалось выше, по концентрациям алюминия, определенным методом ЭПР, удается различать месторождения бериллия и вольфрама, связанные с внеинтрузивными, надинтрузивными в гранитах литий-фтористого типа и внутриинтрузивными грейзенами.

Кварц оловоносных грейзенов и связанных с ними месторождений касситерит-силикатной формации отличается пониженным алюминий-титановым отношением (~ 10), повышенными концентрациями бериллия, олова и ниобия, низкими температурами ТЛ [(T_1—T_5 = 170—180 °С)] и высокими значениями отношений интенсивностей ТЛ [(I_{6-10}/I_{11-13} = 2,06)]; на ИК-спектрах обычна полоса поглощения 3691 $см^{-1}$, связанная с вхождением в кварц фтора.

В кварце оловоносных грейзенизированных гранитоидов главный компенсатор избытка отрицательных зарядов при изоморфизме — натрий, в пегматитах с наложенной грейзенизацией — натрий и литий, в касситерит-силикатной формации преобладают водород и литий.

ТИПОМОРФНЫЕ ПРИЗНАКИ КВАРЦА ОЛОВОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СУЛЬФИДНО-КАССИТЕРИТОВОЙ ФОРМАЦИИ

Как указывалось выше, алюминий постоянно присутствует в кварце месторождений сульфидно-касситеритовой формации в концентрациях от десятых до тысячных долей процента. При этом высокие концентрации типичны только для ранних малосульфидных генераций. Кварц собственно сульфидно-касситеритовой формации содержит первые сотые и тысячные доли процента алюминия. Типоморфное значение приобретают компенсаторы дефицита зарядов: в ранних морионах — натрий, в поздних генерациях кварца — натрий,

Таблица 36

Типоморфные признаки жильного кварца золоторудных месторождений

Параметры	Глубинные месторождения и переходные к ним			Среднеглубинные месторождения		
	$\bar{x}$	Оценка σ_n по отношению к $\bar{x}$	Оценка типоморфного признака	$\bar{x}$	Оценка σ_n по отношению к $\bar{x}$	Оценка типоморфного признака
Al, %:						
общие пробы	0,455	$\leqslant 1$	Важный	0,35	<1	Важный
монофракции	0,069	>1	—"—	0,031	$\simeq 1$	—"—
Na_2O, %	0,077—0,140	$\simeq 0{,}2$	Рядовой	0,043	$\simeq 1$	Рядовой
Na_2O/Li_2O	35,0—36,7	—	Важный	10,8	—	Важный
K_2O/Li_2O	90,5	—	—"—	21,0	—	—"—
Au, г/т	—	—	—	3,3—14,0	>2	Важный
Ag, г/т	до 1,2	>1	Рядовой	0,8—4,5	>2	—"—
As, г/т	<10	>3	—"—	85—840	>2	Важный в случае присутствия золота
Bi, г/т	—	—	—	22—46	$\geqslant 3$	То же
Pb, г/т	1—9	>1	Рядовой	26—180	>2	Важный для золото-полиметаллических формаций
W, г/т	11—690	$\geqslant 1$	Важный для шеелитоносных жил	31—99	>4	Важный для шеелитоносных жил
Sb, г/т	6	$\geqslant 1$	Важный только для переходных формаций	19—20	>2	Важный для золото-сульфидно-кварцевых формаций
Au/Ag	8,0—12,0	—	То же	0,7—1,3	—	Важный
Au/Cu	0,35—0 42	—	Важный	0,04—0,08	—	—"—
Au/Sb	1,3	—	Важный только	0,17—0,19	—	—"—

Продолжение таблицы 36

Параметры	Глубинные месторождения и переходные к ним			Среднеглубинные месторождения		
	$\bar{x}$	Оценка σ_n по отношению к x	Оценка типоморфного признака	$\bar{x}$	Оценка σ_n по отношению к $\bar{x}$	Оценка типоморфного признака
Mo/W	1,2	—	для переходных формаций	0,04—0,11	—	—"—
Светопропускание, %	—	—	—	12,95	$<0,3$	—"—
Содержание газа, $см^3$/100 г кварца	—	—	—	150,9	$<0,5$	—"—
ТЛ, °С T_1-T_5	210—240	—	Важный	200—250	—	—"—
T_{1-5}/T_{6-10}	0,80—0,85	—	—"—	—	—	—"—
T_{6-10}/T_{11-13}	—	—	—	0,77—0,84	—	Рядовой
	0,8—1,0	—	Важный	1,12—1,24	—	Важный
ИК-спектры, υ, $см^{-1}$ $см^{-1}$	2242, 3485, 3315—3320, 3559	—	Рядовой	3430—3420, 3559	—	Рядовой
K_4/K_3	1,24	—	—"—	1,35—1,94	—	Важный
СКС	89,2	$<0,2$	Важный	54,8—83,3	—	—"—
Пьезомодуль, 10^{-15} ед. СИ	116 (28,3—255,1)	—	Рядовой	38,3 (3,3—173,2)	—	—"—
$\alpha-\beta$-переходы, °С	572 ($\sigma_n = 1,1$)	—	Важный	569,8 ($\sigma_n = 0,9$)	—	—"—

литий и водород, а в кварце касситерит-хлорит-сульфидного типа — преимущественно водород и литий [15]. Титан отмечается в количествах сотых — тысячных долей процента только в кварце ранних, наиболее высокотемпературных минеральных парагенезисов Береинского. Ингодинского и Шерловогорского месторождений. В кварце месторождений собственно сульфидно-касситеритовой формации титан не образует концентраций, больших, чем 0,001 %.

Типоморфными рудными элементами в кварце месторождений сульфидно-касситеритовой формации являются олово, бериллий, мышьяк, медь, свинец, серебро, встречающиеся совместно.

Типоморфными признаками являются также низкие (T_{1-5} = = 190—210 °С) температуры первых максимумов на ТЛ-граммах. Следует отметить, что кварц месторождений сульфидно-касситеритовой формации, особенно Дальнего Востока, с позиций типоморфизма изучен далеко не полно.

ТИПОМОРФНЫЕ ПРИЗНАКИ КВАРЦА ГЛУБИННЫХ И СРЕДНЕГЛУБИННЫХ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В табл. 36 приведены типоморфные признаки жильного кварца золоторудных месторождений глубинных и среднеглубинных формаций. Умеренные концентрации алюминия и высокие — натрия, высокие калий-литиевые и натрий-литиевые отношения, низкие концентрации серебра, мышьяка, свинца и сурьмы в совокупности с высокими отношениями концентраций золота и серебра, золота и меди, золота и сурьмы, молибдена и вольфрама позволяют отличать кварц глубинных золоторудных месторождений от других. Типичными оказались и температуры ЕТЛ низкотемпературных максимумов, отношения температур и интенсивностей ЕТЛ Типоморфными признаками являются также относительно разрешенные ИК-спектры в области 3 мкм, высокие значения СКС, пьезомодуля и температуры $\alpha - \beta$-перехода.

Кварц среднеглубинных формаций отличается от кварца глубинных формаций меньшими концентрациями алюминия, натрия и вольфрама, но большими золота, серебра, значительно большими мышьяка, висмута, свинца и сурьмы. Типоморфными признаками кварца являются резко пониженные величины отношений между концентрациями всех типоморфных элементов. Специфичны параметры ЕТЛ: температуры высвечивания, отношения величин интенсивностей. К числу дополнительных типоморфных признаков относятся умеренные величины СКС, количества выделяющейся при нагревании воды (1000—1200 мкл/г) и концентрации воды по данным обработки ИК-спектров, умеренные значения пьезомодуля.

Особенностью жильного кварца глубинных и среднеглубинных формаций является кристаллически-зернистое сложение его агрегатов, почти всегда сохраняющих следы пластических деформаций и перекристаллизации в связи с динамометаморфизмом. Для глубинных месторождений характерны также и мелкодрузовидные тексту-

ры с четкими зонами роста индивидов, локализацией сульфидов и золота в пустотах, образованных как в процессе кристаллизации, так и при последующих преобразованиях жильных агрегатов.

ТИПОМОРФНЫЕ ПРИЗНАКИ КВАРЦА МЕСТОРОЖДЕНИЙ МАЛОГЛУБИННОЙ ЗОЛОТО-СЕРЕБРЯНОЙ ФОРМАЦИИ

Жильный кварц, особенно его агрегаты, достаточно специфичен и характеризуется целым комплексом типоморфных признаков.

Типоморфные признаки сложения агрегатов. Главной чертой облика и макроструктуры жильного кварца месторождений малоглубинной золото-серебряной формации является полосчатое ритмично-периодическое строение, в котором по мере формирования агрегата слои, существенно кварцевые, сменяются слоями, обогащенными алюмосиликатами, главным образом слоистыми силикатами с редкой примесью адуляра в Балейском рудном поле и адуляром с примесью слоистых силикатов в остальных месторождениях.

В кварце изученных рудных полей выпадение минералов серебра (в том числе самородного) и золота приурочено к резким изменениям pH и концентраций. Тонкодисперсные сажистые выделения минералов серебра и сульфосолей, с которыми ассоциирует золото, нередко образуют целые самостоятельные слойки, полоски или цепочки линз. Элементы брекчирования, крустификации, обрастания чрезвычайно характерны дял начальных стадий формирования этих агрегатов.

Другая особенность — обилие сферолитов, дендритовых, скелетных и расщепленных форм индивидов и агрегатов. Наблюдается последовательность смены полосчатых агрегатов массивными, пластинчатыми и шестовато-гребенчатыми. Последние завершают законченные макроритмы и формирование продуктивных ассоциаций в целом. Подобные ритмы периодически повторяются.

Типоморфные признаки состава. Особенностью жильного кварца является его высокая глиноземистость (табл. 37). Кварц месторождений малоглубинной формации содержит аномально высокие концентрации щелочных элементов, главным образом калия и натрия. Типоморфным элементом является и литий. Отношения между концентрациями щелочей различны для кварца разных месторождений, они уменьшаются по мере возрастания глубины образования последних. В общем случае концентрации калия уменьшаются в ряду месторождений от собственно близповерхностных к переходным и среднеглубинным. Особенность кварца рассматриваемых месторождений — высокие концентрации серебра и низкие величины отношения золота к серебру. Количество воды, выделяющейся при нагревании кварца малоглубинных месторождений, значительно больше, чем кварца месторождений других рудных формаций. Максимальные содержания воды определены для кварца Балейского рудного поля.

Типоморфные признаки, отраженные в свойствах. ЕТЛ

Таблица 37. Типоморфные признаки жильного кварца месторождений золото-серебряной формации

Параметры	Месторождения, переходные к малоглубинным			Малоглубинные месторождения		
	$\bar{x}$	Оценка σ_n по отношению к $\bar{x}$	Оценка типоморфного признака	$\bar{x}$	Оценка σ_n по отношению к $\bar{x}$	Оценка типоморфного признака
Al, %	$>1{,}0$	—	Важный	1,37	$\leqslant 0{,}5$	Важный
K_2O, %	0,38	<1	—"—	1,08	<1	—"—
Li_2O, %	0,012	$<0{,}05$	—"—	0,020	$<0{,}2$	Рядовой
K_2O/Na_2O	3,3	—	—"—	12,7	—	Важный
Na_2O/Li_2O	9,6—38,0	—	—"—	4,3	—	—"—
Au, г/т	—	—	—	Широкие вариации		—"—
Ag, г/т	118,6	>2	Важный	113	>1	—"—
Pb, г/т	Высокие	—	—"—	18	>2	—"—
Au / Ag	0,001	—	—"—	$\leqslant 1$	—	—"—
Pb/ Ag	—	—	—	1,7	—	—"—
Cu/ Pb	—	—	—	~ 1	—	—"—
Газоотделение:						
температуры максимума, °С	300—500	$\sim 0{,}5$	Важный	300—500	—	—"—
количество воды, мкл/г	2074	$\sim 0{,}7$	—"—	5678	—	—"—
Количество газовой фазы во включениях, %	27,8	$<0{,}3$	—"—	19,3	$<0{,}3$	—"—
ТЛ, °С T_{1-5}	200—250	—	Рядовой	240—260	—	Рядовой
T_{6-10}	270—320	—	—"—	270—310	—	Рядовой, наблюдается редко
T_{11-13}	—	—	—	320—360	—	Рядовой

Продолжение таблицы 37

Параметры	Месторождения, переходные к малоглубинным			Малоглубинные месторождения		
	$\bar{x}$	Оценка σ_n по отношению к $\bar{x}$	Оценка типоморфного признака	$\bar{x}$	Оценка σ_n по отношению к $\bar{x}$	Оценка типоморфного признака
ИК-спектры: полосы поглощения υ, $см^{-1}$	3586—3581, 3778—3753, 3681	—	Важный	3440	—	Важный
	3430—3420, 3473—3654, 2246	—	Рядовой	3673—3654, 2253	—	Рядовой
K_3 (CO_2), отн. ед.	—	—	—	0,06—0,1	$<0,8$	Важный
K_4 (H_2O), отн. ед.	—	—	—	1,15—1,38	$<0,6$	—"—
K_4/K_3	—	—	—	11,2—21,8	—	—"—
СКС	—	—	—	33,6	$<0,2$	—"—
Пьезомодуль, 10^{-15} ед. СИ	—	—	—	0,83 (0,66—4,62)	—	—"—
$\alpha-\beta$-переходы, °С	—	—	—	557,2 ($\sigma_{\bar{n}}$ = 6,9)		—"—

кварца типична и характеризуется средними температурами T_{1-5} в пределах 220—254 °С с незначительными отклонениями и T_{11-13} — в пределах 320—360 °С. Кварц большинства месторождений имеет два максимума на термолюмограммах. Градиент увеличения интенсивности ЕТЛ кварца с глубиной для малоглубинных месторождений максимален (0,65—2,05); численные его значения являются важным типоморфным признаком оценки уровня их эрозионного среза. Для зон продуктивной минерализации интенсивности варьируют в узких пределах, отношения интенсивностей низко- и высокотемпературных максимумов ЕТЛ кварца в большинстве случаев больше единицы.

Широкая слаборазрешенная полоса на ИК-спектрах с максимумом в области 3440 $см^{-1}$, связанная с высокими концентрациями неструктурной воды, является важным типоморфным признаком кварца месторождений рассматриваемой формации. СКС кварца варьирует в пределах 33,6—37,8 для типичных малоглубинных месторождений и 45—73 — для переходных. Температуры $\alpha-\beta$-переходов низки, среднее значение составляет 557,2 °С. Нормальной температурой характеризуются редкие образцы.

Электрические свойства кварца — электропроводность и диэлектрическая проницаемость — также специфичны. Электропроводность — одна из самых высоких для кварца вообще и обусловлена наличием примесей. Частотная зависимость ДП кварца Балейского месторождения как типичного сильно отличается от всех остальных. В целом наиболее информативна величина ДП на частоте 1 мГц: происходит нарастание ее в ряду глубинные — среднеглубинные — малоглубинные месторождения золота.

Для кварц-золоторудных малоглубинных месторождений Средней Азии характерны радиационные центры O_2^{3-}—Н и SiO_3^{2}. При этом концентрации центров в кварце продуктивных стадий повышены.

Особенностью кварца месторождений малоглубинных формаций являются рыхлость решетки, которая обусловлена особыми условиями кристаллизации. Температуры кристаллизации изменяются от 400—360 в начале до 190—120 °С в конце процесса. Такое изменение температур происходит на интервале глубин всего 300—400 м и в сечении одной жилы. Отмечены аномалии в вертикальной изменчивости температур минералообразования, связанные с развитой на этих месторождениях центростремительной кристаллизацией. Верхние части жил кристаллизуются при более высоких температурах, чем средние и центральные, но на глубоких горизонтах температуры выше, чем на верхних. Поэтому температурная зональность не может быть использована для оценки уровня эрозионного среза.

Приведенные данные об особенностях строения агрегатов, состава жильного кварца и его свойствах являются типичными для месторождений малоглубинной золото-серебряной формации и уже на стадии поисково-съемочных и оценочных работ могут быть использоваться как критерии для отнесения отдельных выходов кварцевых жил к месторождениям и рудопроявлениям этой рудной формации.

ТИПОМОРФНЫЕ ПРИЗНАКИ ЗЕРНИСТЫХ АГРЕГАТОВ КВАРЦА ХРУСТАЛЕНОСНЫХ ЖИЛ

Минералогия кварца (прежде всего кристаллов) хрусталеносных месторождений изложена в ряде специальных работ [5, 7, 12, 21,. 24, 38, 41 и др.]. Поэтому рассмотрим только некоторые типоморфные признаки жильного кварца, вмещающего хрусталеносные полости.

Кварц хрусталеносных жил содержит чрезвычайно низкие концентрации алюминия и титана (табл. 38), которые распределены в нем достаточно равномерно ($\sigma_n = 0{,}3\bar{x}$). Характерно резкое преобладание алюминия над титаном.

В целом жильный кварц хрусталеносных жил и тел содержит близкие к кларковым концентрации рудных элементов [7]. Он характеризуется самыми высокими показателями светопропускания и СКС, низкими температурами ТЛ и газоотделения, близкими к стандарту ДП [7] и температурам α—β-переходов. ИК-спектры кварца умеренно разрешены в области 3 мкм. По данным Г.Н. Богдановой, по мере приближения к хрусталеносным гнездам резко возрастают светосумма и интенсивность ИТЛ. Эта же закономерность проявляется и при грануляции молочно-белого кварца.

Таблица 38

Типоморфные признаки кварца гидротермальных хрусталеносных жил

Параметры	$\bar{x}$	Оценка σ_n по отношению к $\bar{x}$	Оценка типоморфного признака
Al, %	0,0037	~ 0,3 (в нехрусталеносных > 33)	Важный
Ti, %	0,0003	—	—"—
Al/Ti	12, 3	—	—"—
Газоотделение:			
температурный максимум, °С	200—300	—	—"—
количество воды, мкл/г	1118	—	Рядовой
Светопропускание, %	42,3	< 0,5	Важный
Содержание газа, $см^3$/100 г кварца	73,6	< 0,2	—"—
ТЛ: T_1—T_5, °С	190—200, 227—252	—	Рядовой
СКС	92,5	—	—"—

ТИПОМОРФНЫЕ ПРИЗНАКИ БЕЗРУДНОГО ЖИЛЬНОГО КВАРЦА

К настоящему времени в результате изучения кварцевых жил в гранитах, в метаморфических толщах, а также кварца безрудных жильных выполнений в пределах рудных полей выявились не-

Таблица 39

Типоморфные признаки халцедоновидного кварца заключительных стадий формирования среднеглубинных месторождений

Параметры	$\bar{x}$	Оценка σ_n по отношению к $\bar{x}$	Оценка типоморфного признака
K_2O, %	0,14	$< 0{,}3$	Важный
Na_2O, %	0,03	$\simeq 0{,}5$	—"—
Li_2O, %	0,05	$\simeq 0{,}5$	—"—
K_2O/Na_2O	4,5	—	—"—
Na_2O/Li_2O	0,6	—	—"—
K_2O/Li_2O	2,8	—	—"—
Au/Ag	0,02	—	Рядовой
Ag, г/т	1,5	~ 1	—"—
ТЛ, отн. ед.	—	Высокая интенсивность, > 1000	Важный
			—"—
СКС	42,6	$< 0{,}2$	—"—
Газоотделение, мкл/г	> 5000	—	—"—

которые типоморфные признаки безрудного кварца.

Гранулированный кварц. В связи с тем, что гранулированный кварц представляет собой ценное сырье, он изучается многими исследователями. Ему свойственны типичные структуры грануляции, образованные в результате собирательной перекристаллизации с выносом большинства элементов-примесей, в результате чего он практически свободен от них. Он характеризуется умеренным светопропусканием и минимальными п. п. п. (0,022), определенными содержанием газа (16 $см^3$/100 г кварца), водным показателем (2,09) [18—20]. Гранулированный кварц, как правило, образуется в условиях амфиболитовой фации метаморфизма.

Безрудный кварц в пределах рудных полей. Практически на площади любого рудного поля известны безрудные кварцевые жилы, сформированные до или после продуктивных. Непродуктивный кристаллически-зернистый кварц, как правило, имеет первичные шестоватые, гребенчатые, брекчиевидные или вторичные грануляционные или мозаичные структуры и текстуры. Агрегаты безрудного кварца сохраняют структуры и текстуры первичного роста. В ранних высокотемпературных жилах в гнейсах и сланцах обычны примеси циркона, рутила, анатаза, плагиоклаза, мусковита, биотита, кианита, граната, свидетельствующие об их метаморфогенном происхождении. Отсутствуют примеси рудных элементов, но обычны высокие концентрации структурного алюминия и титана. На ТЛ-граммах обычен низкотемпературный пик (170—230 °С), почти всегда этот пик — единственный. На ИК-спектрах отсутствуют полосы поглощения в области 2330—2390 $см^{-1}$, характеризующие связанную углекислоту. Этот кварц обладает относительно высокими светопропусканием (23), п. п. п. (0,058 %), умеренным водным показателем (3,18) [18—20].

Наряду с ранним безрудным кварцем почти всегда присутствуют постпродуктивные кварцевые жилы халцедоновидного кварца. В табл. 39 приведены их важнейшие типоморфные признаки.

Структуры такого кварца тонкозернистые, нередко скрытокристаллические, текстуры — массивные, неяснорадиально-лучистые, неяснополосчатые, грубополосчатые, фестончатые. Они нередко содержат реликты раннего кварца, кальцита, флюорита, сульфидов. К числу важных типоморфных признаков их относятся высокие концентрации лития, умеренные — калия и натрия, но величины отношений концентраций щелочей —одни из самых низких. Концентрации рудных элементов очень низкие. Интенсивность ТЛ и газоотделение необычайно велики. Максимум газоотделения приходится на 100—200 °С, что свидетельствует о низкотемпературном их образовании в отличие от похожих по облику кварцевых агрегатов месторождений малоглубинной золото-серебряной формации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение кварца показывает большую сложность этого минерала, удивительное разнообразие его состава и свойств, которые изменяются не случайно, а в соответствии с изменчивостью условий его образования.

Закономерные изменения состава и свойств кварца в последовательно образованных агрегатах, частях жил, месторождениях и их формационных рядах показали единство причин этого явления. Кварц большинства рудных месторождений выделяется из флюидов в узком интервале температур, а температуры начала его кристаллизации находятся в пределах 450—380 °С; верхняя температурная граница для пегматитов и грейзенов достигает 580 °С. Об этом свидетельствуют не только температуры гомогенизации включений, но и, как показала Е. И. Доломанова, реликты β-кварца в α-кварце, в частности, оловорудных месторождений. Концентрированность существенно силикатных флюидов по литературным данным [16, 21, 27, 32—33 и др.], а также по данным большого числа анализов состава включений варьирует от 100 до 600 г/кг H_2O, что указывает на возможность существование своеобразных рассолов-расплавов или магм, в которых главными компонентами, вероятно, являются кремнекислоты, гидрооксо-, тио-, хлоридные и фторидные комплексы металлов. При этом хлоридно-натровые растворы типичны для месторождений серебра, золота, висмута, среднеглубинных и малоглубинных месторождений олова, а фторидно-натролитиевые — для месторождений глубинных и частью среднеглубинных — олова, вольфрама, молибдена и пегматитов.

Для месторождений золото-серебряных формаций обычно матрицей рудного парагенезиса является кварц со слоистыми силикатами или с адуляром (нередко субграфической структуры), а для молибденовых и отчасти вольфрамовых и оловорудных — кварц с микроклином. Примечательно, что кварц-полевошпатовые жилы наблюдаются в условиях непосредственной связи рудных жил с магматическими тела-

ми. На одном из близповерхностных месторождений серебра наблюдались прямые переходы от кислых эффузивов к адуляр-кварцевым жилам с субграфическими срастаниями кварца и полевого шпата (адуляр), а также концентрически-зональные выделения с галенит-сфалеритовыми ядрами, облекаемыми ритмично повторяющимися оболочками адуляра, рудных минералов и кварца. Подобная последовательность, выражающаяся в ритмичном повторении триады: алюмосиликаты — сульфиды (самородные элементы) — кварц, в принципе едина для месторождений малоглубинных золото-серебряных и золото-серебряно-полиметаллических формаций.

В месторождениях, где установлены фациальные переходы от среднеглубинных к малоглубинным (Широкинское рудное поле; данные В.С. Кормилицына и А.А. Ивановой, 1968 г.), поздние близповерхностные жилы полиметаллических руд ритмично-полосчатой и колломорфной текстуры слагаются триадами: сидерит (с примесью сульфидов) — сульфиды (с примесью сидерита и кварца) — кварц (с примесями марганцовистого доломита). В месторождениях глубинных и среднеглубинных формаций эта триада выражена слабее, но в жилах месторождений молибдена (Бугдаинское, Жирекенское) она состоит из микроклина, молибденита (+ халькопирит) и кварца (+ флюорит), образующих последовательно сменяющиеся ассоциации и их агрегаты. Эта общность последовательности смены определенных групп минералов обусловлена единой для всех указанных типов месторождений направленностью эволюции рудогенерирующих флюидов в связи с ритмичной сменой равновесий на фоне снижения температур. До 400 °С во флюиде все компоненты находятся в ионной форме, а затем наступает прогрессирующее формирование коллоидных кремнекислородных систем с металлами. В частности, постоянная совместная встречаемость золота, серебра и кварца рядом исследователей [29 и др.] связывается со стабилизирующей ролью золя кремнезема вследствие адсорбционных взаимодействий коллоидных металлов, освобождающихся при диссоциации их комплексных соединений, с кремнекислотами. Золи SiO_2 имеют слабокислый характер, и повышение относительной концентрации алюминия и щелочей способствует их коагуляции и образованию полевого шпата и слоистых силикатов в результате замещения в мономерах кремниевых кислот кремния алюминием, а гидроксила калием, натрием или литием. Этот процесс в связи с периодическим изменением соотношений концентраций кремнекислот, щелочей и алюминия может повторяться многократно по мере расходования в системе и перехода в твердую фазу примесных компонентов.

Халькофильные и другие рудные компоненты выпадают из раствора в моменты резких изменений температур (первые генерации рудных минералов), а затем — pH на фоне постепенных изменений температур (последующие генерации), образуя скопления на переходах от поздних существенно кварцевых частей ритмов и слоев к началу последующих, обогащенных глиноземом и щелочами. При этом массовое выпадение рудных компонентов может быть обус-

ловлено высокой адсорбционной способностью слоистых силикатов, обладающих большой поверхностью и малой кислотностью.

В начальной стадии эволюции распределение алюминия, щелочей и рудных элементов в существенно силикатной системе относительно равномерно по всему ее объему. Поэтому в первые моменты внедрения флюида в трещину из нее сбрасываются в приконтактовых частях только чужеродные для нее компоненты, относительно которых она пересыщена (сера, мышьяк, сурьма, железо, вольфрам, олово, молибден, золото, серебро и халькофилы, а также глинозем и щелочи). Это и находит отражение в выделении ранних компонентов триад ритмичных построек в околоконтактовых частях жил.

После затвердевания приконтактовых и верхних передовых частей флюида ценой несовершенства ранних генераций грязного кварца и тонкозернистых агрегатов рудных минералов (обычно наблюдаемое явление в кварцевых жилах месторождений вольфрама, олова, молибдена, золота, серебра, полиметаллов) система развивается в условиях относительной консолидации. Продолжающаяся быстрая теплоотдача и дегазация приводят к повышению концентрации флюида и его гетерогенизации на разных уровнях: групп агрегатов (слоев с криволинейными фестончатыми границами раздела) и микроагрегатов с образованием субсферических сегрегаций. Образование криволинейных поверхностей раздела в данных условиях энергетически выгодно.

Процессы кристаллизации включают фазы полимеризации кремнекислот, как это показано в работах В.С. Кормилицына, Ф.А. Летникова, В.А. Нарсеева и других исследователей. На конечных стадиях минералообразование идет из истинных слабоконцентрированных остаточных растворов, содержащих обычно примесные элементы в количествах, соизмеримых с изоморфной вместимостью решетки кварца, и они входят в его структуру. В случае высоких их концентраций они дают крупные кристаллы,в том числе позднего золота, пирита, сульфосолей, карбонатов и др.

Эволюция минералообразующих систем — процесс квантованный в смысле ритмично-периодического выделения и распределения вещества, размеров минеральных индивидов и агрегатов, способа заполнения ими пространства. Это четко проявлено не только в жилах рудных месторождений (Au, Ag, Bi, Sn, W и др.), но и на большинстве жильных флюоритовых месторождений, во флюорит-аметистовых жилах, в агатах и др.

Наиболее просто рассмотренный механизм кристаллизации расшифровывается при изучении молодых, еще метастабильных, неметаморфизованных существенно кварцевых жил месторождений малоглубинных формаций. Реликты ритмично построенных агрегатов сохраняются в кварцевых жилах метаморфизованных месторождений. Элементы ритмично-периодического (преимущественно макроскопического) распределения вещества наблюдаются в большинстве месторождений олова, вольфрама, в скарнах и пегматитах. Причину его многие исследователи видят в метасоматической дифферен-

циации. Не отрицая метасоматической дифференциации вещества в скарнах, околорудноизмененных породах и т. д., более вероятным следует признать (об этом свидетельствуют многочисленные факты), что большинство рудных жил есть результат кристаллизационной дифференциации существенно силикатных растворов-расплавов, проходящих на определенных этапах эволюции стадию коллоидного состояния [37], которое является лишь защитной реакцией минералообразующих систем, попадающих в условия с большими градиентами температур и давлений.

Ход эволюции минералообразующих систем, временная последовательность появления продуктов минералообразования зависят не столько от абсолютных значений термодинамических параметров, сколько от скоростей их изменения, градиентов, определяющихся глубиной или тектонической обстановкой. Изменчивость минералообразующей среды приводит, в свою очередь, к закономерной изменчивости состава, соотношений структурных и неструктурных примесей и свойств кварца, отражающейся через устойчивые пределы их вариаций. Эти пределы являются типоморфными признаками условий минералообразования, которым соответствуют определенные типы месторождений в рядах рудных формаций.

Важнейшими типоморфными признаками, которые наблюдаются непосредственно в полевых условиях, являются структуры и текстуры агрегатов: простые мелкокристаллические, мелко-и крупнозернистые, гранобластовые, разнозернистые, толстошестоватые, гребенчатые, друзовидные и грануляционные характерны для месторождений среднеглубинных формаций, а тонко- и микрозернистые массивные (микросферолитовые), тонкоритмично-полосчатые, фестончатые (микросферолитовые, тонкошестоватые), пластинчатые (скелетные, каркасные) и связанные с ними постепенными переходами — показатели месторождений малоглубинной формации; ритмичнополосчатые, фестончатые, сферолитовые (радиально-лучистые), в которых индивиды кварца в шестоватых сростках преимущественно по оси *c* имеют размеры более 1—5 мм, но находятся в ассоциации с полосами хлорита, гидрослюд, адуляра, являются показателями месторождений, переходных от среднеглубинных к малоглубинным.

По размерам зерен и цвету зернистого кварца различаются его агрегаты, связанные с различными фациями метаморфизма: гигантозернистый стекловидный светло-дымчатый и гранулированный среднезернистый присущ альмандин-амфиболитовой фации, а молочнобелый гиганто-, крупно- и среднезернистый и микрогранулированный — фации зеленых сланцев.

Гигантозернистый кварц с друзовидной текстурой и слабо развитой грануляцией указывает на вероятность связи с ним месторождений горного хрусталя.

Для золотоносного кварца среднеглубинных месторождений характерны чаще всего деформационные структуры с незавершенной

грануляцией, и критериями его являются разнозернистость, волнистое, паркетное и мозаичное угасание и блокованность.

Важными типоморфными свойствами кварца являются цвет и термолюминесценция. Изменчивость окраски в ряду морион — дымчатый кварц — цитрин - горный хрусталь отражает понижение pH в процессе кристаллизации. Появление к концу роста дымчатых и аметистовых окрасок свидетельствует о локальном повышении щелочности, а аметист еще характеризует и повышение парциального давления кислорода и указывает на близповерхностные условия. Развитие аметиста на заключительных стадиях формирования рудных жил, в общем случае, — показатель небольших глубин их образования.

Величина степени совершенства структуры (СКС) оказалась чрезвычайно информативной относительно определения фаций глубинности и скорости кристаллизации.

ЕТЛ является одним из критериев оценки относительных глубин кристаллизации, а также присутствия тех или иных типоморфных примесей. Типоморфными признаками кварца из месторождений различных рудных формаций являются формы его ТЛ-грамм. По ним же можно судить о качестве кристаллосырья и вероятной золотоносности. К типоморфным признакам относятся ИК-спектры жильного кварца, количество и характер выделения из него углекислоты и воды, вариации его геохимической специализации как литофильными, так и рудными элементами. Важнейшие из последних — изоморфные алюминий, титан и германий, натрий и литий, а также калий, серебро, медь, свинец, сурьма. Важно соотношение структурных и неструктурных примесей.

Как типоморфные признаки кварца, характеризующие принадлежность его к месторождениям определенных рудных формаций, можно рассматривать его электрические свойства: диэлектрическую проницаемость и изменчивость электропроводности при нагревании.

Изучение типоморфизма кварца еще далеко от завершения, но есть все основания ожидать, что в ближайшее время появится возможность с успехом применять критерии оценки рудоносности кварцевых жил, установленные на основе систематического изучения вариаций его свойств и состава с использованием минералогического картирования, на всех этапах изучения месторождений — от поисково-оценочных работ до детальной разведки и эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андрусенко Н.И., Щепотьев Ю.М.* Температурный режим формирования и стадийность субвулканических золото-серебряных месторождений Центральной Камчатки. — Геохимия, 1974, № 2, с. 179—186.

2. *Афанасьева М.А., Каменцев И.Е., Франк-Каменецкий В.А.* Колебания параметров элементарной ячейки кварца различного генезиса. — Кристаллография, 1959, т. 4, вып. 3, с. 382—385.

3. *Балицкий В.С., Махина И.Б., Цинобер Л.И.* О вхождении фтора в кристаллы синтетического кварца. — Геохимия, 1974, № 3, с. 487—492.

4. *Балицкий В.С., Лысаков В.С., Серебренников А.И.* О влиянии физико-химических условий синтеза на характер термовысвечивания кварца. — Геохимия, 1971, № 9, с. 1144—1149.

5. *Балицкий В.С., Лисицына Е.С.* Синтетические аналоги и имитации природных драгоценных камней. М., Недра, 1981.

6. *Бершов Л.В., Марфунин А.С., Сперанский А.В.* Новый стабильный радиационный центр в кварце. — Изв. АН СССР, сер. геол., 1978, № 11, с. 106—116.

7. *Буканов В.В.* Горный хрусталь Приполярного Урала. Л., Наука, 1974.

8. *Булдаков И.В., Гаврюченков Ф.Г.* О зависимости температуры α—β-превращений природного кварца от размеров его элементарной ячейки. — В кн.: Минералогия и геохимия. Л., 1972, вып. 4, с. 55—58.

9. *Васильева Н.Н., Соломкина С.Г.* Типоморфные особенности флюорита и кварца. М., Недра, 1965.

10. *Геологическое* строение, минералогия и особенности генезиса золоторудных месторождений Балейского рудного поля (Восточное Забайкалье)/ Н.В. Петровская, П.С. Бернштейн, С.Г. Мирчинк и др. — Тр. ЦНИГРИ, вып. 45, ч. 2. М., Госгеолтехиздат, 1961.

11. *Гинзбург А.И., Кузьмин В.И., Сидоренко Г.А.* Минералогические исследования в практике геологоразведочных работ. М., Недра, 1981.

12. *Григорьев Д.П.* Онтогения минералов. Львов, Изд-во Львовск. ун-та, 1961.

13. *Григорьев Д.П., Жабин А.Г.* Онтогения минералов. М., Наука, 1975.

14. *Гришин В.М., Изюмский С.И., Гапуов Т.Г.* О термолюминесценции кварца из золоторудных месторождений Северного Казахстана. — Зап. ВМО, 1971, т. 100, вып. 2, с. 153—162.

15. *Доломанова Е.И., Бершов Л.В., Гасоян М.С.* Изоморфные элементы-примеси в жильном кварце оловорудных месторождений Забайкалья и их генетическое значение. — Изв. АН СССР, сер. геол., 1972, № 6, с. 65—74.

16. *Ермаков Н.П., Долгов Ю.А.* Термобарогеохимия. М., Недра, 1979.

17. *Жабин А.Г.* Онтогения минералов (агрегаты). М., Наука, 1979.

18. *Жильный* кварц восточного склона Урала, ч. 1/Г.Н. Вертушков, Э.Ф. Емлин, Г.А. Синкевич и др. — Тр. Свердловск. горн. ин-та, вып. 58. Свердловск, 1969.

19. *Жильный* кварц восточного склона Урала, ч. 2/Г.Н. Вертушков, Ф.Ф. Борисков, Э.Ф. Емлин и др. — Тр. Свердловск. горн. ин-та, вып. 66. Свердловск, 1970.

20. *Жильный* кварц восточного склона Урала, ч. 3. — Тр. Свердловск. горн. ин-та, вып. 80. Свердловск, 1970.

21. *Захарченко А.И.* Минералообразующие растворы и генезис кварцевых жил. М., Госгеолтехиздат, 1955.

22. *Исследования* в области физики твердого тела, вып. 2. Иркутск, Изд-во Иркутск . ун-та, 1973.

23. *Каменцев И.Е.* О влиянии температуры кристаллизации кварца на вхождение структурной примеси алюминия. — Минер. сб. Львовск. ун-та, №21, 1967, вып. 4, с. 396—399.

24. *Комов И.Л., Николаенко В.Л., Никитин А.В.* Термолюминесценция природных кристаллов кварца. — Изв. АН СССР, сер. геол., 1971, № 4, с. 88—93,

25. *Комов И.Л., Самойлович М.И.* Влияние условий роста на особенности инфракрасных спектров поглощения кристаллов природного кварца. — Докл. АН СССР, 1979, т. 246, № 2, с. 449—451.

26. *Куршев С.А., Труфанов В.Н.* Опыт изучения газово-жидких и твердых включений в минералах под электронным микроскопом. — В кн.: Минералогическая термометрия и барометрия. М., Наука, 1965, с. 112—117.

27. *Лебедев Л.М.* Метаколлоиды в эндогенных месторождениях. М., Наука, 1965.

28. *Леммлейн Г.Г., Цинобер Л.И.* Некоторые особенности морфологии кристаллов искусственного кварца. — Тр. ВНИИП, т. 4, 1962.

29. *Летников Ф.А., Вилор Н.В.* Золото в гидротермальном процессе. М., Недра, 1981.

30. *Марфунин А.С.* Спектроскопия, люминесценция и радиационные центры в минералах. М., Недра, 1975.

31. *Минералы.* Справочник, т. 2, М., Наука, 1965.

32. *Минералогическая* термометрия и барометрия, т. 1. М., Наука, 1968.

33. *Минералогическая* термометрия и барометрия, т. 2. М., Наука, 1968.

34. *Минералогия* и кристаллофизика ювелирных разновидностей кремнезема. М., Недра, 1979.

35. *Наумов Г.Б., Рыженко Б.Н., Ходаковский И.Л.* Справочник термодинамических величин. М., Атомиздат, 1971.

36. *О влиянии* условий образования и примесей на параметры элементарной ячейки природного кварца /Н.Ф. Картенко, Г.А. Сидоренко, С.Г. Соломкина и др. — В кн.: Рентгенография минерального сырья, № 3. М., Недра, 1971, с. 8—41.

37. *Основные* проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. М., Изд-во АН СССР, 1953.

38. *Павлишин В.И.* Типоморфизм кварца, слюд и полевых шпатов в эндогенных образованиях (на примере минеральных комплексов Украины). Л., 1980.

39. *Панов Е.Н., Муратов И.Г., Касатов Л.Н.* Исследования вариаций температуры $\alpha-\beta$-превращения кварца гранитоидов северо-восточного Забайкалья. — Докл. АН СССР, 1967, т. 175, № 6, с. 1359—1362.

40. *Петровская Н.В.* Некоторые особенности внутрирудного метаморфизма золото-кварцевых образований на примере месторождений Енисейского кряжа. — Тр. ЦНИГРИ, Золото, М., 1956, вып. 21, с. 3—45.

41. *Применение* ИК-спектроскопии и ЭПР к изучению геохимических особенностей формирования кристаллов кварца /И.Л. Комов, Л.Н. Хетчиков, Л.И. Цинобер и др. — В кн.: Кристаллохимия минералов и геохимические проблемы. М., Наука, 1975, с. 221—227.

42. *Солнцев В.П., Машковцев Р.И.* Стабилизация атомов серебра и меди в α-кварце. — Физика твердого тела, 1978, № 3, с. 812—816.

43. *Состав* и физические свойства параморфозы α-кварца по β-кварцу из пегматитов Волыни /Е.И. Доломанова, Г.А. Юргенсон, В.Д. Перевертаев и др. — Изв. вузов, Геология и разведка, 1976, № 3, с. 50—59.

44. *Таращан А.Н.* Люминесценция минералов. Киев, Наукова думка, 1978.

45. *Термолюминесцентные* особенности жильного кварца Донецкого бассейна и их геологическое значение /О.А. Красильщикова, В.И. Павлишин, А.Н. Таращан и др. — Геол. журнал, 1976, т. 36, вып. 2, с. 65—76.

46. *Типоморфизм* минералов и его практическое значение. М., Недра, 1972.

47. *Физические* исследования кварца. Под ред. Л.И. Самойловича и Л.Н. Хетчикова. М., Недра, 1975.

48. *Франк-Каменецкий В.А.* Природа структурных примесей и включений в минералах. Л., Наука, 1964.

49. *Юргенсон Г.А., Тупяков В.Е., Широкий О.И.* Вариации состава и свойств жильного кварца месторождения золото-сульфидно-кварцевой формации как отражение рудной зональности и условий образования. — Геология рудн. месторождений, 1979, т. 21, № 3, с. 56—67.

50. *Юргенсон Г.А., Тумуров Г.Т.* О совершенстве кристаллического строения жильного кварца. — Изв. вузов, Геология и разведка, 1980, № 6, с. 50—59.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Введение	4
Глава I. Современное состояние изученности состава, структуры и свойств кварца	5
Глава II. Методические особенности изучения типоморфизма кварца	35
Глава III. Типоморфные признаки жильного кварца	49
Глава IV. Типоморфные признаки жильного кварца как критерии рудно-формационной принадлежности и рудоносности	128
Заключение	142
Список литературы	147

ГЕОРГИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ЮРГЕНСОН

ТИПОМОРФИЗМ И РУДОНОСНОСТЬ
ЖИЛЬНОГО КВАРЦА

Редактор издательства Л.М. Старикова
Обложка художника С.В. Аладьева
Художественный редактор Е.Л. Юрковская
Технический редак ор О.Ю. Цишевская
Корректор К.И. Савенкова
Оператор Н.В. Бондаренко

ИБ № 5186

Подписано в печать 12.09.84. Т-06909. Формат 60 X 90 1/16. Бумага офсетная № 1. Набор выполнен на наборно-пишущей машине типа ИБМ "Композер". Гарнитура Сенчури. Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,5. Усл. кр.-отт- 9,75. Уч.-изд. л. 11,5. Тираж 2150 экз. Заказ2829/9029-14. Цена 60 коп.

Ордена "Знак Почета" издательство "Недра", 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19

Московская типография № 9 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва Ж-33, Волочаевская, 40.

Уважаемый товарищ!

ИЗДАТЕЛЬСТВО "НЕДРА" ГОТОВИТ К ПЕЧАТИ — НОВЫЕ КНИГИ

ЕФРЕМОВА С. В., СТАФЕЕВ К.Г. Петрохимические методы исследования горных пород: Справочное пособие. 40 л. 2 р. 40 к.

Рассмотрены составные части горных пород, выражаемые в виде окислов, общие особенности химизма магматических, осадочных и метаморфических горных пород, их средние составы, способы пересчетов, а также изображения химических составов горных пород на диаграммах (бинарные, фигурные, точечные, треугольные, прямоугольные, столбчатые, четверные, парагенетические и др.) и значение различных диаграмм для петрологического анализа горных пород. Приведены новые методы с использованием математического аппарата и ЭВМ. Пособие в таком полном объеме выпускается впервые.

Для геологов и петрографов, занимающихся исследованием горных пород, специалистов ряда смежных наук. Может быть использовано преподавателями и студентами геологических специальностей вузов и университетов.

КАНТОР Б.З. Минерал рассказывает о себе. 10 л. 30 к.

В популярной форме изложены основные вопросы морфологии минералов и образования природных кристаллов. Даны начальные понятия кристаллографии и необходимые сведения о кристаллографических формах минералов. Описаны зарождение и рост природных кристаллов. Охарактеризованы минеральные индивиды и агрегаты, их возникновение, рост и развитие в зависимости от условий кристаллизации. Освещены методы и значение изучения различных минеральных форм. На примере наиболее известных минералов показано, как форма кристаллов и их особенности позволяют расшифровать условия формирования минералов.

Для широкого круга читателей, интересующихся природными камнями.

КЛАССИФИКАЦИЯ лунных магматических пород. Богатиков О.А., Гоньшакова В.И., Фрих-Хар Д.И. и др. 7 л. 35 к.

Впервые осуществлена классификация лунных магматических пород на основе принципов, апробированных при систематике земных образований и с применением методов математической статистики. Подобный унифицированный подход не только подчеркивает общность магматизма Земли и Луны, но и позволяет корректировать на основании опыта изучения земных пород выделение таксономических подразделений лунных пород и сравнивать их с одноименными земными. Как и для земных пород классификация лунных магматических пород дается на химико-минералогической основе и является многоступенчатой.

Для геологов различных специальностей: петрологов, петрографов, планетологов.

МАРХИНИН Е.К. Вулканизм. 20 л., 3 р. 40 к.

Вулканизм охарактеризован как природное явление, присущее не только Земле, но и другим космическим телам (Луне, Марсу, Меркурию, Венере, спутникам Юпитера), высказано мнение, что вулканизм — это форма развития планет. Рассмотрены современные вулканические процессы на Земле, описаны продукты вулканизма, как силикатные, так и летучие. На основе метода актуализма прослежено развитие вулканизма в истории Земли от архея до новейшего времени. Освещена роль вулканизма в формировании внешних оболочек планеты (коры, гидросферы и атмосферы) его значение для образования различных типов месторождений полезных ископаемых, роль вулканических процессов в возникновении жизни на Земле.

Для геологов, геофизиков, геохимиков, океанологов и географов; может быть использована студентами соответствующих специальностей.

Интересующие Вас книги Вы можете преобрести в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу, или заказать через отдел "Книга–почтой" магазинов:

№ 17 – 199178, Ленинград, В.О., Средний проспект, 61;

№ 59 – 127412, Москва, Коровинское шоссе, 20

Издательство "Недра"

60 коп.

НЕДРА