

В. Г. БАЛАКИРЕВ
Е. П. МЕЛЬНИКОВ

Электронно- микроскопическая фрактография кварца



МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР
Всесоюзный научно-исследовательский
институт синтеза минерального сырья

В. Г. БАЛАКИРЕВ
Е. П. МЕЛЬНИКОВ

Электронно- микроскопическая фрактография кварца

*Заднепробскому
Борису Ивановичу
с увлечением
автора
Балакирев
3.3.92.*



Москва "Недра" 1991

Балакирев В. Г., Мельников Е. П. Электронно-микроскопическая фрактография кварца/Мин-во геол. СССР, Всесоюз. науч.-исслед. ин-т синтеза минер. сырья.— М.: Недра, 1991.— 120 с.: ил.— ISBN 5-247-02779-5.

Впервые представлено систематическое электронно-микроскопическое исследование основных разновидностей природных кварцевых образований, а также искусственных кристаллов кварца. С помощью методов электронной фрактографии проведена классификация микротопографии поверхностей разрушения жильного кварца месторождений СССР. Для выделения классификационных признаков в качестве эталонных объектов использовались образцы искусственных монокристаллов кварца, синтезированных при известных термодинамических параметрах и природного кварца. Изложенный материал представляет интерес при исследовании кварца как модельного объекта твердого тела, является аргументом при решении вопросов генезиса кварца и может использоваться при качественной оценке природного и синтетического кварцевого сырья.

Для специалистов, занимающихся проблемами генезиса, обогащения кварца, свойств и технологии производства кварцевых стекол, геологов, минералогов и петрографов.

Табл. 1, ил. 66, список лит. — 15 назв.

Выпущено по заказу Всесоюзного научно-исследовательского института синтеза минерального сырья

Научно-технический прогресс второй половины текущего столетия стимулировал рост производства новых конструкционных материалов, в том числе получаемых на кварцевой основе.

В настоящее время промышленностью широко используются природные и искусственные высококремнеземистые соединения для получения изделий с комплексом ценных физико-химических свойств. Объем производства материалов данной группы, косвенно свидетельствующий об уровне технического, экономического и культурного развития общества, ежегодно возрастает в СССР и за рубежом на 3—10 %.

В связи с этим углубленное исследование кварцевых образований, определение условий формирования кварца и оценка его качества под влиянием повышения технических требований промышленности к используемым кварцевым концентратам является весьма актуальной задачей.

Основное содержание книги представляют собой электронно-микроскопические (ЭМ) снимки, полученные с различных поверхностей кварца и интерпретация особенностей их прецизионного изучения. Изложена совокупность данных трех направлений, выражающихся понятиями: кварц, фрактография и электронная микроскопия. Кварц представляет собой один из наиболее распространенных минералов литосферы. Массовая доля кварца в земной коре составляет 12,6 %. Благодаря своей частой встречаемости в природе, участию в различных рудно- и петрогенетических процессах и обладанию комплексом ценных физико-химических свойств он является очень благоприятным материалом для исследований, в том числе и электронно-микроскопическим методом.

Электронно-микроскопическая фрактография — графика поверхностей разрушения, заключающая в себе информацию о свойствах вещества и деформациях, сопровождающих это разрушение. Для фрактографического изучения кварц вследствие своей маловыразительной спайности оказался чрезвычайно благодатным объектом. Его можно расколоть практически в любом направлении и любом месте, что представляется затруднительным для других распространенных минералов. В морфологии поверхностей сколов, наблюдаемых невооруженным глазом, в оптическом микроскопе, под электронным микроскопом в чем-то проявляется схожесть, в чем-то различие. На уровне электронной микроскопии различаются поверхности сколов — собственные и несобственные. Собственные поверхности сколов, по которым можно с некоторой степенью достоверности идентифицировать кварц в поликристаллических минеральных ассоциациях, были изучены на чистых бездефектных модельных монокристаллах. Второй тип поверхностей образуется при пересечении ска-

лывающей трещиной различного типа дефектов, присущих кварцу, изучение которых имеет двоякое значение. С одной стороны, дефекты определяют механическую и электрическую прочность кварца, окраску, электрофизические и другие характеристики, а с другой стороны — по набору и типу дефектов, степени их концентрации и морфологическим особенностям устанавливается предыстория данного образца. Для кварца в масштабе электронной микроскопии характерны следующие типы дефектов: твердые и газовой-жидкие включения (ГЖВ), дислокации, до-финейские и бразильские двойники, междо-кристаллитные и междо-зерновые границы, микротрещины. Объектами наших исследований были включения и различные поверхности раздела (излома) по границам зерен и микротрещинам.

Иллюстрационный материал — электронно-микроскопические снимки — был получен с помощью метода платиноугольных ре-п-лик. Этот удивительный метод, изобретенный Д. Е. Бредли в 1958 г., позволяющий выявлять тончайшие особенности микро-топографии и микроморфологии поверхностей, давно уже был оттеснен в сторону индустриальной электронной микроскопией, снабженной высокоэффективной техникой подготовки образцов и мощными ЭВМ, способными анализировать ЭМ изображения. Однако оказалось, что этот метод не прошел до конца свой путь, что для него была оставлена своя информационная «эко-логическая ниша» — электронно-микроскопическая фраттогра-фия кварца.

В данной книге авторы попытались проиллюстрировать воз-можности электронной микроскопии для решения генетических проблем месторождений кварца и технологических аспектов оценки кварцевого сырья.

Формационная систематика природных кварцевых образований, приведенная в таблице, разработана Е. П. Мельниковым с учетом известных классификаций месторождений кварцевого сырья [2, 5, 7]. В основу систематики положены следующие признаки: а) генетическая принадлежность, геологические и термодинамические условия формирования кварцевых тел; б) вещественный состав продуктивных тел; в) формации, субформации и минеральные типы существенно кварцевых и монокварцевых образований; г) характер процессов диафтореза первичных формаций кварца; д) естественная последовательность образования выделенных формаций кварцевого сырья.

Главными особенностями разработанного варианта формационной классификации, отличающими его от ранее опубликованных, являются следующие: определение позиции и промышленной роли метаморфогенных кварцевых тел; выделение селективов (метасилекситов) в качестве самостоятельной формации среди кварцевых метаморфитов и, наконец, введение понятия и соответственно классификационного подразделения — диафторированные первичные формации кварца этапа тектонометаморфической активизации.

Широкий термодинамический диапазон образования минералов кремнезема (T от 273 до $>2000\text{ K}$, P от 0—5 МПа до 10 ГПа) обуславливает их участие в различных процессах петро- и рудогенеза, благоприятствует использованию кварца в качестве объекта исследований, но одновременно и осложняет генетическую и формационную систематику образований. Определенные затруднения при этом вызывает и дискуссионность вопроса о выделении метаморфических формаций (Ю. Ир. Половинкина, В. Г. Кушев, М. С. Дюфур и др.). Однако большинство исследователей (А. А. Маракушев, Н. Л. Добрецов, Д. В. Рундквист, Я. Н. Белевцев, В. А. Глебовицкий и др.) на современном этапе развивают новое направление в учении о формациях — понятие о метаморфических формациях и отстаивают необходимость формационного анализа метаморфических толщ и связанных с ними полезных ископаемых, что представляется логичным завершением учения о геологических формациях, являющегося выдающимся достижением советской геологической науки. Наибольший вклад в разработку формационного анализа применительно к кварцевым образованиям, обоснование выделения метаморфических формаций природного кварца и вообще метаморфогенного кварцеобразования внесли Ю. М. Соколов, Ю. Н. Ануфриев, А. В. Осинский, Е. П. Мельников и др. [2]. При этом в дополнение к геологическим особенностям кварцевых тел метаморфогенного и магматогенного происхождения Е. П. Мельниковым [6] предложены минералого-геохимические

Главнейшие генетические и промышленные типы природных кварцевых об

Серия	Группа	Класс	Генетический тип	Хрустале-кварцосодержащие, хрусталекварцевосные формации	Генотипы месторождений
1	2	3	4	5	6
Эндо-генная	Магмато-генная	I. Постмагматический	I.A. Пегматитовый	I.A.1. Редкометалльно-пегматитовая	Тамелла (Финляндия); Хагендорф (ФРГ); Воджина (Австралия); Бикита (Зимбабве)
				I.A.2. Хрусталеносно-пегматитовая	Украина, Казахстан (СССР)
				I.A.3. Силекситовая	Урал, Казахстан (СССР)
			I.B. Пневматолито-гидротермальный	I.B.1. Кварцево-апоскарновая	Трепча (СФРЮ), Азегур (Марокко)
				I.B.2. Кварцево-апогрейзенная	Авока, Ардлентан, Плаймер Ривер (Австралия)
				I.B.3. Кварцево-полевошпатовая	Казахстан (СССР)
				I.B.4. Вторично-кварцитовая	Коунрад, Семиз-Бугу (СССР)
				I.B.5. Кварцево-пропилитовая	Оуро (Боливия), Крипл-Крик (США)
				I.B.6. Кварцево-березитовая	Алтай (СССР), Джуно (США)
				I.B.7. Кварцево-аргиллизитовая	Ватиха, Шайтан (СССР)
				I.B.8. Джасперовидная	Хайдаркен (СССР), Ваншань (КНР), Карлин (США)
	Метаморфогенная	II. Орто-метаморфический	II.A. Метаморфогенно-пегматитовый	II.A. Слюдосно-пегматитовая	Прибайкалье, Карелия (СССР)
				II.A.2. Селектитовая	Карелия (СССР), Риламанд (Индия)

разований

Классы кварцевого сырья исходных формаций	Примеры	Классы кварцевого сырья лабифицированных формаций	Генотипы месторождений кварца
7	8	9	10
ХОНЭКВАРЦ, тикокварц	1.A.1 (Г)	Тикокварц	Лас-Таннас (Аргентина), Мугоджары (СССР), Серидозинью (Бразилия)
	1.A.1 (X)	ПЬЕЗОКВАРЦ	Эспирито-Санта (Бразилия) Баян-Обо (МНР)
ПЬЕЗОКВАРЦ	1.A.2 (X)	ПЬЕЗОКВАРЦ	Урал (СССР), Кассонги (Ангола), Баян-Обо (МНР)
	1.A.3 (X)	ПЬЕЗОКВАРЦ	Кинг-Айленд (Австралия), Янзюлли (КНР)
ЭТЭРОКВАРЦ, ХОНЭКВАРЦ, тикокварц	1.A.3 (Д)	ЭТЭРОКВАРЦ, ХОНЭКВАРЦ	
—	1.B.1 (X)	Тикокварц, ПЬЕЗОКВАРЦ	Кингсгрейт, Вольфрам-Кэмп, Петфорд (Австралия)
—	1.B.2 (X)	Тикокварц, ПЬЕЗОКВАРЦ	Урал, Тянь-Шань (СССР)
Этерокварц	1.B.3 (X)	Тикокварц, ПЬЕЗОКВАРЦ	Урал, Казахстан (СССР)
Этерокварц	1.B.4 (X)	Пьезокварц	Льяльягуа (Боливия), Хаканджин (СССР)
—	1.B.5 (X)	Пьезокварц	Урал, Якутия (СССР)
ЭТЭРОКВАРЦ ХОНЭКВАРЦ	1.B.6 (Р)	Тикокварц, Пьезокварц	Урал (СССР)
—	1.B.7 (X)	Пьезокварц	Тальян (СССР), Каразнью (Бразилия)
—	—	—	—
ХОНЭКВАРЦ, тикокварц	II.A.1 (Г)	ТИКОКВАРЦ Пьезокварц	Урал (СССР) Северо-Байкаль- ское нагорье (СССР)
ЭТЭРОКВАРЦ, ХОНЭКВАРЦ	II.A.2 (Г)	ТИКОКВАРЦ	Прибайкалье, Урал (СССР)

Продолжение табл.

Серия	Группа	Класс	Генетический тип	Хрустале-кварцсодержащие, хрустале-кварценоносные формации	Генотипы месторождений
1	2	3	4	5	6
Экзогенная	Осадочная	III. Параморфический	II. Б. Метаморфогенно-гидротермальный	II. Б. 1. Дистен-кварцево-метаматитовая	Урал (СССР)
				II. Б. 2. Дистен-эклогит-сланцевая кварцево-жильная	Урал, Мугоджары (СССР)
				II. Б. 3. Эклогит-глаукофан-зелено-сланцевая	Урал (СССР)
				II. Б. 4. Зелено-сланцевая кварцево-жильная	Урал (СССР)
				II. Б. 5. Диафорез-зеленосланцевая кварцево-жильная	Урал (СССР), Шики-Шики (Бразилия)
		IV. Механического накопления	III. А. Метаморфогенно-осадочный	III. А. 1. Кварцитовый формационный ряд	Бакальское, Антоновское, Тарасовское (СССР)
				III. А. 2. Кварцево-песчанниковый формационный ряд	Урцкое, Черемшанское (СССР), Клендова (Польша), Глоссен, Вайсенфельд (ФРГ)
				IV. А. 1. Формационный ряд прибрежно-морских россыпей	Новоселовское, Люберецкое (СССР); Стрелеч, Зрни (ЧСФР); Бяла Гора (Польша); Моль (Бельгия); Хальтерн, Граслебен Веферлинг, Хохенбок (ФРГ); Фонтенбло (Франция); Херлен (Голландия)
				IV. А. 2. Формационный ряд пролювиально-аллювиальных (ложковых, речных) россыпей	Моркелун-Хилл (США), Эспириту-Санту (Бразилия)
				V. А. 1. Формационный ряд диатомитов и трепелов	Фогельсберг (ФРГ); шт. Калифорния (США); Западная Сибирь (СССР)
		V. Биохимического накопления	V. А. Биохимический		

Классы кварцевого сырья исходных формаций	Примеры	Классы кварцевого сырья диафторированных формаций	Генотипы месторождений кварца
7	8	9	10
Хонэ кварц	—	—	—
ЭТЭРОКВАРЦ, Хонэ кварц	II.Б.2(Р)	Тикокварц	Мугоджары (СССР)
ХОНЭКВАРЦ, тикокварц	II.Б.2(Г) II.Б.3(Р)	ТИКОКВАРЦ Тикокварц	Урал (СССР) Урал, Средняя Азия (СССР)
Этерокварц, хонэ кварц	II.Б.4(Р) II.Б.4(Х)	ХОНЭКВАРЦ, тикокварц ТИКОКВАРЦ, ПЬЕЗОКВАРЦ	Урал, Забайкалье (СССР) Казахстан (СССР)
ЭТЭРОКВАРЦ, ХОНЭКВАРЦ	II.Б.5(Х)	ТИКОКВАРЦ, ПЬЕЗОКВАРЦ	Сети-Лагоас, Норт-Сентрал (Бразилия)
ЭТЭРОКВАРЦ	II.В.1(П)	Хонэ кварц, Тикокварц (?)	Джетыгаринское, Ицильское, Мак- бальское (СССР)
ЭТЭРОКВАРЦ	II.В.2(П)	ХОНЭКВАРЦ	Бататейра, Минмоза (Бразилия)
ЭТЕРОКВАРЦ	—	—	—
ЭТЭРОКВАРЦ	—	—	—
ХОНЭКВАРЦ	—	—	—

Продолжение табл.

Серия	Группа	Класс	Генетический тип	Хрустале-кварцевые, хрустале-кварцевые формации	Генотипы месторождений
1	2	3	4	5	6
	Выветривания	VI. Химического и физического выветривания	VI.A. Эрозивно-осадочный VI.B. Инфильтрационный	VI.A.1. Формационный ряд элювиально-делювиальных россыпей VI.B.1. Формационный ряд инфильтратов (кварц, аметист, опал, хризопраз) халцедонового замещения и выполения	Комехас-де-Мейо, Сьерра-де-Лагрина (Бразилия) Сарыкулболды. Магнитогорское (СССР). Тштанбара, Кубер-Педи, Уайт-Клифс, Марлборо-Крик (Австралия); Никель-Маунтин (США)

Примечание. Классы кварцевого сырья по областям использования (графы 7-8): тикварц — кристаллы горного хрусталя, блоковый, жильный исходный изредка кремнезема; хонкварц — жильный, блоковый, исходный или рекристаллизованный стекла, хрусталя, синтеза монокристаллов; этрокварц — сырье для флюсов, динаса. Метаморфизованные и диафорированные формации образований (графа 8): Г — грануляция; П — перекристаллизация.

критерии определения генетической и формационной принадлежности природных обособлений: состав газово-жидких включений в кварце, общая сумма элементов-примесей ($\Sigma_{\text{общ. эл.}}$), сумма рудных компонентов, создающих в кварцевом стекле окрашивающие включения ($\Sigma_{\text{окр. эл.}}$), сумма щелочных элементов ($\Sigma_{\text{щел. эл.}}$), содержание Al, Ge и другие геохимические параметры.

Особенности кварца метаморфогенно-гидротермального генезиса заключаются преимущественно в углекисло-водном составе газово-жидких включений или в повышенном (в среднем 4,0 моль/кг H_2O , по данным В. А. Буряка) содержании CO_2 в растворах по сравнению с кварцем постмагматически-гидротермального класса, низком общем содержании в кварце элементов-примесей и окрашивающих компонентов, низких значениях отношения $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ и других коэффициентов.

В соответствии с изложенными представлениями, существенно кварцевые и монокварцевые образования подразделены по единому методологическому принципу на две группы (магматогенную и метаморфогенную), два класса (постмагматический и ортометаморфический) и четыре генетических типа (пегматитовый, пневматолито-гидротермальный, метапегматитовый, метагидротермальный) с соответствующими им первичными рудными (кварцевыми) и производными от них вторичными (метаморфизованными и/или диафорированными) формациями. Разработанная классификация учитывает различия условий петрогенезиса и геологической позиции объектов, структуру, веществен-

Классы кварцевого сырья исходных формаций	Примеры	Классы кварцевого сырья анафторированных формаций	Генотипы месторождений кварца
7	8	9	10
ЭТЕРОКВАРЦ	—	—	—
ЭТЭРОКВАРЦ	—	—	—

и 9): пьезокварцы — кристаллы горного хрусталя, пригодные для получения пьезокварца; кристаллизованный и гранулированный кварц, использующийся для получения плавильного кварца, применяющийся для получения многокомпонентного, ультрафиолетового, оптического кварца, фильтров и пр. Прописными буквами выделены промышленные типы кварцевого сырья. Д — дислокация (разлистование); Р — рекристаллизация; Х — хрусталеобразование.

ный состав и геохимические особенности слагающего их кварца, являющиеся функцией термодинамического уровня формирования природных кварцевых тел. Выделенные формации и соответствующие им генотипы месторождений рассмотрены и увязаны в историко-геологическом аспекте с эволюцией подвижных поясов или областей тектонометаморфической и магматической активизации, чем определяется их строгая временная и геологическая позиции.

Имеющиеся геологические и термобарогеохимические материалы о генезисе, локализации, временной последовательности образования, приуроченности к определенным этапам геосинклинального развития складчатых поясов и периодам тектонометаморфической активизации, структуре, вещественном составе и некоторых других свойствах природных кварцевых образований позволяют установить некоторые общие закономерности их формирования и размещения [2].

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

2. Кварцево-рудные (золото-кварцевые, редкометалльно-кварцевые, полиметаллически-кварцевые и т. п.) жилы обнаруживают достаточно отчетливую связь с интрузивными комплексами. Сложены они разнозернистым кварцем молочно-белого или серовато-белого цвета, содержащим в массовом количестве рав-

померно рассеянные первичные и приуроченные к трещинам вторичные ГЖВ.

Рудно-кварцевые жилы, имеющие метаморфогенное происхождение, достаточно подробно охарактеризованы со структурно-вещественной и геолого-генетической точки зрения В. А. Буряком и другими исследователями.

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

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

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

Геологические данные и парагенезисы минералов-примесей кварца ранних формаций свидетельствуют об их образовании при различных температурах, но всегда при высоких давлениях, отвечающих глаукофановой, амфиболитовой (с реликтами гранулитовой и экологитовой) и эпидот-амфиболитовой фациям дистен-силлиманитовой серии. Тип растворов, законсервированных ГЖВ, углекисло-водный с высоким содержанием газовой фазы (от 30 до 90 %). Нейтронно-активационными, ИК- и масс-спектроскопическими исследованиями с частичным использованием электронной микроскопии устанавливается наименьшая «загрязненность» индивидов кварца ранних формаций элементными, структурными, газово-жидкими и минеральными примесями.

Две поздние формации жильного кварца (II.B.4 и II.B.5) появляются на заключительных этапах эволюции геосинклинальных систем в период преобладающего развития дизъюнктивных нарушений и проявления низкотемпературного регионального

метаморфизма или диафтореза и представлены крупно- и гигантозернистым первично кристаллизованным молочно-белым кварцем с большим количеством газовой-жидких (первичных и вторичных) включений.

Эти формации кроме первичного кварца могут содержать в том или ином количестве рекристаллизованно-гранулированный (так называемый фрагментарный) и наложенный перекристаллизованный (хрусталеносный) кварц. Геологическая позиция и парагенезисы минералов, изофациальных с кварцем характеризуемых формаций, позволяют в общем определять условия их образования на термодинамическом уровне эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фации. Тип растворов, содержащихся в ГЖВ кварца этих формаций, хлоридный, иногда с высокой концентрацией солей (до 40 %) или хлоридно-бикарбонатный, обычно в случаях развития хрусталеносного перекристаллизованного кварца. По данным методов нейтронной активации, ИК- и масс-спектроскопии образцов неметаллоносного кварца поздних формаций в них содержится повышенное количество минеральных, газовой-жидких и элементных структурных примесей.

Возможности электронной микроскопии для решения рассматриваемых вопросов использовались недостаточно.

При выборе объектов электронно-микроскопических исследований преследовались цели: обеспечить представительность обоих классов (постмагматического и ортометаморфического) магматогенной и метаморфогенной групп, охватить возможно больший термодинамический диапазон образования природного кварца и уделить должное внимание важным в генетическом и прикладном аспекте метаморфогенным кварцевым формациям. При этом также имелось в виду, что пневмолито-гидротермальные образования постмагматического класса так называемого рудно-кварцевого парагенезиса достаточно подробно изучены.

Кварц метаморфогенных образований, обладающий лучшими качественными параметрами, позволяет использовать его как эталонный, модельный, объект исследования, где каждый из дефектов (включения, характер границ индивидов, микродислокации) может быть исследован в «чистом» виде, что весьма затруднительно в кварце иного происхождения, содержащего в большом количестве различные дефекты.

Изучены образцы 10 формаций природного кварца: трех формаций постмагматического класса (редкометалльно-пегматитовый, хрусталеносно-пегматитовый и силекситовой), семи формаций ортометаморфического класса (слюдоносно-пегматитовой, силектитовой, т. е. метасилекситовой, кварцево-метасоматитовой, дистен (эклогит)-сланцевой кварцево-жильной, глаукофан (эклогит)-зеленосланцевой кварцево-жильной, зеленосланцевой кварцево-жильной, хрусталеносной диафторез-зеленосланцевой кварцево-жильной) и значительное количество образцов искусственных монокристаллов кварца, синтезированных при известных термодинамических параметрах.

Редкометалльно-пегматитовая формация представлена объектами Алтая, хрусталеносно-пегматитовая — Украины и силекситовая — Среднего Урала. Формации ортометаморфического класса исследовались из месторождений различных регионов: слюдоносно-пегматитовая — Средний Урал и Карелия, силектитовая — Прибайкалье и Средний Урал, кварцево-метасоматитовая — Казахстан, дистен(эклогит)-сланцевая кварцево-жильная — Южный Урал и Киргизия, глаукофан(эклогит)-зеленосланцевая кварцево-жильная — Южный Урал, зеленосланцевая кварцево-жильная — Приполярный Урал, диафторез-зеленосланцевая кварцево-жильная — Южный и Приполярный Урал. Подробная характеристика перечисленных формаций приведена в работе Е. П. Мельникова [2].

Изученные формации были представлены образцами из первично кристаллизованного кварца (редкометалльно-пегматитовая и слюдоносно-пегматитовая формации) и кварца, претерпевшего различные диафторические преобразования — грануляцию (слюдоносная, селектитовая и дистен(эклогит)-сланцевая кварцево-жильная формации), хрусталеобразование (хрусталеносно-пегматитовая и диафторез-зеленосланцевая кварцево-жильная формации), разлистование (силекситовая формация) и рекристаллизацию (зеленосланцевая и глаукофан-зеленосланцевая кварцево-жильные формации).

Перечисленные процессы кристаллизации или наложенных изменений кварца отразились в особенностях строения и дефектов на фрактограммах кварца различных формаций. Необходимо отметить, что исследованная коллекция образцов дает не только системное представление о природных и искусственных разновидностях кварца на электронно-микроскопическом уровне, что интересно в генетическом отношении, но в то же время представляет месторождения кварца, непосредственно использующегося важнейшими отраслями науки и техники в качестве сырья для производства пьезоэлементов, плавленого кремнезема высокой чистоты, оптического, художественного и непрозрачного кварцевого стекла, синтеза монокристаллов, при получении диноса, флюсов, фарфора, фильтров, ферросплавов и других материалов.

Она позволяет использовать установленные феноменологические особенности природного кварца различного генезиса и для изучения рудных формаций «кварцевого парагенезиса», по выражению академика В. И. Смирнова. Выявленные на электронно-микроскопическом уровне фрактографические характеристики природного кварца могут применяться при прогнозно-поисковых исследованиях и качественно-технологической оценке рудных и нерудных месторождений полезных ископаемых. Проведенные прецизионные фрактографические исследования кварца не только выполняют прикладную цель — получение дополнительных объективных данных для описания кварца разных объектов, но и подтверждают методами электронной микроскопии отличие

кварца постмагматического и метаморфогенного происхождений. Например, впервые достоверно установленные на электронно-микроскопических снимках многочисленные расплавные включения в крупных силекситовых телах среднеуральского типа свидетельствуют о кристаллизации кварца указанных месторождений не из гидротермального раствора, а из расплава и окончательно подтверждают правомерность их выделения в особую силекситовую формацию магматогенной группы [2].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИГОТОВЛЕНИЕ ПРЕПАРАТОВ

Для изучения микротопографии поверхностей минералов и их ассоциаций в настоящее время широко используется сканирующая микроскопия, обладающая большой глубиной резкости, позволяющая анализировать состав и распределение элементов в исследуемом объекте и производить компьютерную обработку полученной информации. Традиционный метод реплик проигрывает сканирующей микроскопии по ряду технических возможностей, однако метод одноступенчатых платиноугольных реплик, впервые предложенный Д. Е. Бредли, обладает пока лучшей проработкой мельчайших деталей микрорельефа поверхности и находит применение в электронной петрографии минералов.

Для кварца метод платиноугольных реплик обладает особенно высокой эффективностью. Реплики легко снимаются с поверхностей сколов и изломов в водных растворах плавиковой кислоты или с помощью желатина. По Д. Е. Бредли, предельное разрешение Pt C-реплик должно составлять 1 нм. Однако обычно в практике электронной микроскопии (ЭМ) используются реплики с разрешением 1,5—3 нм. Следует заметить, что исследователи при изучении минералов используют угольные реплики, хотя платиноугольные реплики имеют лучшее разрешение по плоскости изображения, лучшую контрастность и обладают способностью визуализации деталей атомарных размеров, распределенных вдоль нормали к поверхности минерального объекта.

Эта способность заключается в следующем. При напылении платиноугольной реплики атомы платины из источника, вследствие большой атомной массы (195,09 а.е.м.), летят в вакууме практически прямолинейно и захватываются в первую очередь выступающими деталями микрорельефа, например, ступенями атомарной высоты на поверхности кристаллического вещества. При поступлении новых атомов платины высота ступеней еще более увеличивается, в результате чего они легко обнаруживаются на ЭМ изображении реплики. Эффект визуализации деталей микрорельефа атомарных размеров физически отличен от вакуумного декорирования золотом, с помощью которого можно

также выявлять ступени атомарных размеров на поверхностях некоторых минералов. Необходимое условие вакуумного декорирования — миграция атомов золота по атомарно-гладкой поверхности к ступеням, вдоль которых зародыши золота устойчивы. Наши попытки вакуумного декорирования кварца закончились неудачно, так как атомы золота ни при каких условиях не мигрируют по его поверхности; в месте преимущественной кристаллизации частиц золота у ступеней образуется большое количество островков, расположенных независимо от деталей микрорельефа.

Визуализация ступеней и других малоразмерных объектов на поверхности кристаллического вещества на платиноугольной реплике проявляется только в том случае, если ступени расположены на расстоянии большем, чем размер кристаллитов, слагающих реплику. Установлено, что размер этот зависит от толщины реплики, способа испарения Pt и C и состояния самого образца.

В процессе напыления чистой углеродной реплики атомы углерода также, как и атомы платины, летят в вакууме из источника испарения прямолинейно. Однако вследствие малой атомной массы C (12,011 а. е. м.) происходит соударение его атомов с молекулами остаточных газов (CO , CO_2 , O_2 , N_2 , H_2O), масса которых больше массы атома углерода, вследствие чего изменяется траектория полета атомов, и углеродная реплика обнаруживается в областях геометрической тени. Если бы на углеродной реплике и проявился эффект декорирования ступеней, как на платиноугольной реплике, то в электронном микроскопе этот эффект был бы неразличим вследствие слабого рассеяния электронного пучка на атомах углерода. Амплитуда рассеяния электронов на веществе определяется следующей формулой:

$$f(\theta) = m^0 l^2 / 2 h^2 (\lambda \sin \theta)^2 (Z - f_x),$$

где $f(\theta)$ — амплитуда атомного рассеяния; m^0 — масса покоя электрона; l — заряд электрона; h — постоянная Планка; λ — длина волны электрона; θ — угол рассеяния; Z — атомный номер элемента; f_x — число электронов.

Из этого выражения видно, что амплитуда атомного рассеяния пропорциональна атомному номеру элемента Z , вследствие чего для обеспечения достаточного контраста углеродной реплики необходимо значительно увеличивать ее толщину, ухудшая при этом ее предельное разрешение.

Съемку изображений на репликах в электронном микроскопе рекомендуется производить при увеличениях, не превышающих 15 000 крат, так как при больших увеличениях происходит не просто пропорциональное умножение, а качественное преобразование картины на основе дифракционного контраста, в результате чего на изображении начинает появляться зернистость, реплика и качество изображения значительно ухудшается. Изобра-

жение на негативе без заметной потери качества можно увеличить дополнительно, но не более чем в 5—6 крат.

Несмотря на широкое распространение метода реплик в электронной микроскопии минералов [6], необходимо отметить частую ошибочную интерпретацию электроно-микроскопических изображений. Одной из самых распространенных ошибок является неправильное определение положительного и отрицательного характера деталей микрорельефа. Избежать этой ошибки позволяет использование так называемого «правила теней» (В. И. Васильев) при рассмотрении ЭМ изображений правильных геометрических фигур, например, полусферических ямок и сферических частиц кремнезема, полученных с помощью реплик (рис. 1) *. Тень, на негативе темная, на позитиве белая, расположена внутри круга, являющегося сечением сферической частицы кремнезема (проекцией частицы на изображении является круг), расположена за пределами этой частицы и легко распознается на реплике.

Если морфология микрорельефа поверхности неизвестна, диагностику следует производить в следующем порядке.

1. Поверхность кварца на микроуровне, как правило, не является плоской, поэтому угол оттенения на различных участках реплики различный. В областях очень косоугого оттенения (более светлые зоны) легко определяется знак деталей микрорельефа.

2. На поверхностях граней, сколов, изломов часто присутствуют мелкие осколки кварца, отцепленные кварцевые волокна, частички разного происхождения, которые всегда являются деталями положительного характера.

3. Иногда невозможно использовать первые два способа. В этом случае необходимо рассмотреть негатив или позитив при 4—5-ти кратном увеличении. При определенном навыке можно научиться определять направление тени по кристаллитам Pt самой реплики, которые имеют собственную тень, различимую при хорошей фокусировке в электронном микроскопе. Необходимо заметить, что высококачественное изображение реплики, получаемое при небольшом недофокусе, на современных электронных микроскопах исправляется простым переключением соответствующего тумблера.

4. Если невозможно использовать ни один способ для определения знака детали микрорельефа, следует применить дифракционную электронную микроскопию для прямого изучения вещества.

Конкретные примеры ошибочной интерпретации и появление артефактов приводятся в соответствующих разделах.

В самом общем случае для избежания ошибочной интерпретации ЭМ изображений рекомендуется никогда не использовать только один ЭМ метод. Основное содержание книги — фактограммы кварца, сделаны с помощью платиноугольных реплик,

* Рисулки помещены на вкладке в конце книги.

однако в своей работе мы применяли также оптическую и сканирующую микроскопию, дифракционный контраст, микродифракцию и микроанализ. Дополнительный источник информации был получен при подборе соответствующих образцов кварца, в которых рассматриваемый дефект или свойство присутствуют в явном, преобладающем виде.

Препараты из кварцевых пород для ЭМ готовились следующим образом. Из соответствующего образца кварца алмазной пилой вырезались бруски сечением 8×8 , 7×7 , 6×6 мм таким образом, чтобы плоскость сечения соответствовала исследуемой поверхности сколов. Необходимо заметить, что резка на бруски, несмотря на усложнение работы, позволяет очень экономно расходовать изучаемые образцы. Затем на наковальне из твердого сплава от бруска откалывались чешуйки кварца «диаметром» 3—5 мм и толщиной 0,1—0,3 мм (в целях предосторожности для того, чтобы осколки кварца не разлетались в стороны, наковальня с образцом накрывается тонкой прозрачной полиэтиленовой пленкой). Чешуйки указанных размеров могут плавать на поверхности 40 %-ного раствора HF, удерживаясь силами поверхностного натяжения; это свойство кварца использовалось для отделения платиноугольной реплики. После того, как реплика отделилась, она должна некоторое время (5—20 мин) плавать в дистиллированной воде для полного растворения продуктов реакции. Если требовалось изготовить реплику с экстракцией, то отделение от образца производилось с помощью желатины. Сколы монокристалльного кварца готовились по способу, описанному в 1975 г. В. Г. Балакиревым.

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ СКОЛОВ МОНОКРИСТАЛЛЬНОГО КВАРЦА

Основное содержание данной книги составляют фрактограммы природного кварца. Термин «фрактография» происходит от английского слова *«fracture»*, означающего трещину, излом, раскол. Как указано в геологическом словаре, излом — это форма поверхности, образующаяся при раскалывании минералов, не обладающих спайностью, и ряда горных пород. В литературе по разрушению металлов для обозначения поверхностей вязкого разрушения употребляется термин «поверхность излома», а при хрупком разрушении — «поверхность скола»; в литературе по электронной микроскопии минералов и горных пород новообразованные поверхности, полученные путем ударного раскалывания, описываются терминами «поверхность излома», «поверхность раскола», «поверхность скола» [3]. Вместе с тем, в механике разрушения поликристаллических и многокомпонентных систем, к которым относятся кварцевые породы, различаются

транскристаллитное и интеркристаллитное разрушения. При транскристаллитном разрушении трещина распространяется по объему зерна — кристаллита, во втором случае трещина проходит преимущественно по границам зерен. Во избежание путаницы термин «поверхность скола» мы будем использовать для описания фрактограмм транскристаллитного разрушения кварца, а термин «поверхность излома» — для обозначения поверхностей раздела по границам кварцевых зерен.

Прежде чем приступить к рассмотрению дефектов природного кварца, выявляемых путем электронно-микроскопической фрактографии, необходимо определить морфологические особенности сколов кварца как минерала в кварцосодержащих породах и охарактеризовать все типы поверхностей сколов, которые можно получить на монокристалльном кварце.

В масштабе электронной микроскопии плоские поверхности скола в зернах кварца встречаются очень редко. Наиболее распространенная поверхность скола — гладкая, слегка искривленная. Типы сколов, которые наиболее часто встречаются при изучении кварцосодержащих и кварцевых пород, — это раковистый (рис. 2, а) и ручьевого (рис. 2, б). Раковистый скол представляет собой поверхность, выпуклую или вогнутую, похожую на форму раковины. Обычно на поверхности раковистого скола присутствуют осколки кварца, расположенные иногда периодически по краям «раковин». Осколки кварца, как и волокна образовались в процессе раскалывания при взаимодействии многочисленных ветвящихся и переплетающихся микротрещин, локализованных на главной магистральной трещине.

Ручьевого скол изобилует большим количеством разветвляющихся ступеней, вдоль которых происходит отщепление кварцевых волокон — кристаллических щепок, впервые обнаруженных в 1969 г. В. И. Васильевым. Кварцевые волокна могут иметь круглое или гранное сечение, а также могут быть монокристалльными или аморфными согласно микродифракционным данным. Степень аморфизации волокон зависит от их толщины (чем тоньше волокно, тем она выше), условий раскалывания (хрупкое или вязкое разрушение) и кристаллографической ориентировки (на поверхности скола, близкого к плоскости пинакоида $\{0001\}$ (рис. 3, а) волокна аморфны, а волокна на поверхности сколов $\{10\bar{1}1\}$, $\{01\bar{1}1\}$, $\{101\bar{0}\}$ и $\{112\bar{0}\}$ сохраняют кристалличность до толщины 4—5 нм). Монокристалльные волокна имеют плавные изгибы и если их много (рис. 4, в), то они переплетаются между собой вследствие взаимодействия электростатических сил на нескомпенсированных оборванных связях Si—O—Si. Аморфные волокна имеют резкие изгибы и, как правило, круглое сечение.

Следующей по частоте встречаемости в образцах природного кварца является сетчатый микророльеф или так называемый скол «крышки часов» (см. рис. 3, а, 4, б). Путем ориентирован-

ного раскалывания монокристалльного синтетического кварца было установлено, что сетчатый скол обычно образуется на поверхностях, соответствующих плоскости пинакоида $\{0001\}$. Изменяя условия раскалывания, сетчатые сколы можно получить и на поверхностях других ориентировок $\{10\bar{1}0\}$, $\{11\bar{2}0\}$, однако они морфологически отличны от пинакоидального скола. Пинакоидальный сетчатый скол в поликристаллическом природном кварце встречается часто вследствие того, что транскристаллитная трещина, проходя по многим кварцевым зернам, имеющим различную ориентировку, в некоторых из них может совпасть с плоскостью пинакоида.

Кроме перечисленных типов сколов на поверхностях любых кристаллографических ориентировок встречается полосчатый скол или так называемые линии Вальнера (см. рис. 4, а), которые представляют собой застывшую картину колебаний волн звуковой и ультразвуковой частот на стенках трещин. Профиль волн может быть синусоидальным и пилообразным, периодичность расположения гребней, как правило, меняется, однако на протяженных поверхностях полосчатого скола (>1 см) встречаются участки со строгой периодичностью. На рис. 3, б представлен чрезвычайно интересный снимок скола природного кварца, на котором присутствует твердое включение игольчатой формы. Здесь фактически визуализированы: 1) процесс распространения волн в кварце (фронт трещины распространялся справа налево, показано стрелкой); 2) явление дифракции волн при огибании ими препятствия в виде твердого включения; 3) отражение волн и их интерференция (на снимке интерферирующие волны показаны кружочками). Средняя длина волны, измеренная на снимке, составляет 280 нм при скорости распространения трещины 2,5 км/с, частота колебаний равна 9 ГГц.

Поверхности скола с участками периодического микрорельефа (сетчатого и ступенчатого) можно наблюдать визуально, так как при определенном освещении они обладают иризацией, подобно игре цветов на поверхностях благородного опала.

Описанные типы сколов наблюдаются независимо от содержания дефектов в кварце. Если кристаллы кварца или кварцевая порода двойникованы по бразильскому или дофинейскому закону, то в электронном микроскопе границы двойников можно наблюдать на свежем сколе. При двойниковании по бразильскому закону вrostки компонент различного знака хорошо различимы по контрасту (см. рис. 4, в). Граница дофинейского двойника отчетливо видна на сколе под оптическим микроскопом, однако найти ее на реплике в электронном микроскопе очень трудно вследствие чрезвычайно слабого контраста. Поэтому дофинейские двойники в кварцевых породах не диагностировались.

Сообщения о присутствии бразильских двойников в кварцевых породах очень скупы. Согласно данным Г. Н. Вертушкова и других, бразильские двойники были обнаружены в стекловидном

гигантозернистом кварце, однако в зернах гранулированного кварца они не встречаются. В изученных образцах кварцевых пород бразильские двойники не наблюдались. Это может быть обусловлено следующими причинами.

1. Установлено, что бразильские двойники в идиоморфных кристаллах кварца образуются на гранях положительного ромбоэдра $\{10\bar{1}1\}$. Перекристаллизация и рекристаллизация кварцевых пород происходят на границах раздела слагающих их зерен, и вполне можно допустить, что в некоторых кварцах бразильские двойники действительно отсутствуют, так как отсутствуют условия роста кварцевых зерен через грань $\{10\bar{1}1\}$.

2. Предполагается, что бразильские двойники встречаются, в основном, в кристаллах кварца низкотемпературного генезиса [13].

3. Бразильские двойники на уровне ЭМ можно наблюдать только в том случае, когда компоненты двойников имеют размеры менее 50 мкм (это размер ячейки поддерживающей медной сеточки, на которой монтируется платиноугольная реплика). В противном случае двойниковые вроски на ЭМ изображениях не идентифицируются.

Препараты для электронной микроскопии готовились путем ударного раскалывания, при котором кварц испытывает различного рода деформации. В связи с этим необходимо учитывать изменения в образцах, возникающие в результате механического воздействия. Если скорость деформации $\dot{\epsilon}$ составляет менее 10^{-6} с^{-1} , то перед фронтом распространения трещины образуется скопление дислокаций. При скорости деформации более 10^{-6} с^{-1} впереди трещины зона наиболее напряженного материала превращается в стеклообразную ламель, вокруг которой происходит двойникование по дофинеysкому закону.

Образование стеклообразного слоя на поверхности скола кварца можно наблюдать экспериментально, так как скорость травления кварцевого стекла выше скорости травления кристаллического кварца. Например, платиноугольная реплика со свежих сколов $(01\bar{1}1)$ и $(10\bar{1}0)$ чистого бесцветного бездислокационного синтетического кварца, имеющих площадь $0,36 \text{ см}^2$, отделяется в 40 %-ном HF при комнатной температуре за 5 и 15 с соответственно (различное время обусловлено различием в скорости травления граней отрицательного ромбоэдра и гексагональной призмы). Если затем на те же сколы нанести платиноугольную реплику, то отделение ее в плавиковой кислоте происходит уже за 1 и 2 мин.

ДЕФЕКТЫ НА ПОВЕРХНОСТЯХ СКОЛОВ КВАРЦЕВЫХ ЗЕРЕН

Согласно литературным данным, зерна природного кварца содержат следующие типы дефектов: газово-жидкие (ГЖВ) и твердые включения, поры, субмикроскопические включения (СВ), дислокации и точечные дефекты [8, 10]. В масштабе просвечивающей ЭМ не идентифицируются точечные дефекты и включения размером более 50 мкм. При пересечении транскристаллитной трещиной индивида дефекты на поверхности скола кварцевого зерна оставляют следы в виде своеобразных деталей микрорельефа, которые с помощью электронной фрактографии можно диагностировать с некоторой степенью достоверности. Однако часто встречаются случаи, когда диагностические признаки являются общими для нескольких типов дефектов, в результате чего диагностика становится затруднительной.

Газово-жидкие включения

При оптических наблюдениях Н. П. Ермаков газово-жидкие включения разделил на три группы: макроскопические (0,5 мм), видимые невооруженным глазом, микроскопические (от 0,1 до 0,01 мм) и субмикроскопические, которые измеряются микрометрами или даже долями микрометров.

Объектом ЭМ исследований являются микроскопические и субмикроскопические ГЖВ. Морфология полостей ГЖВ чрезвычайно разнообразна: они могут быть ограниченными, полуограниченными и неограниченными. Оптическая фотография газово-жидких включений приведена на рис. 5, а. При ЭМ изучении кристаллов кварца различного генезиса В. Е. Соношкин выделил четыре типа вакуолей включений: ограниченные в виде отрицательных кристаллов, полуограниченные, глобулевидные, сложной конфигурации. Им была установлена тенденция усложнения морфологии полостей при переходе от магматического и пегматитового кварца к гидротермально-метаморфическому, а также было отмечено улучшение гранности форм включений при уменьшении их размеров. В. И. Васильев при ЭМ изучении рудоносного кварца установил, что к контурам включения примыкают линии — границы тончайших ступеней рельефа скола кварца.

При пересечении ГЖВ трещиной на поверхности скола образуется ямка, размеры которой зависят от произвольного расположения поверхности скола по отношению к ГЖВ, вследствие чего истинные размеры включения неизвестны. Реплика на дне ямки образуется в том случае, если на поверхности изучаемого скола отсечена меньшая часть или половина ГЖВ. В противном случае в месте расположения на реплике ГЖВ будет дырка. При вскрытии газово-жидкого включения освобождается его газовая и жидкая фазы.

В вакуоли ГЖВ могут присутствовать одна или несколько фаз: газовая, одна или две несмешивающиеся жидкости, минералы-спутники и дочерние минералы. Состав газовой-жидкой фазы изменяется от почти чистой воды до концентрированного водного раствора — рапы, содержащего Na, K, Ca, Mg, Cl, Fe, SO_4 , CO_2 , различные углеводороды и в меньших количествах VO_3 , PO_4 , HSiO_3 , CO_2 [8, 9].

В качестве одного из признаков распознавания ГЖВ на уровне ЭМ Васильевым В. И. предлагалось использовать наличие шероховатости рельефа стенок вакуолей. Наши данные показывают, что шероховатость может быть обусловлена или коррозией стенок вакуолей, или отложением на них тонкодисперсных частиц. При отсутствии коррозии и загрязняющих веществ в окрестности включения стенки вакуолей чистые (газовая фаза, чистая вода, вакуумное ГЖВ). Если такие вещества присутствуют и на стенках ГЖВ, и на окружающем его сколе, то легко распознается их вторичный характер (например, одни и те же загрязняющие вещества покрывают и только что образовавшиеся ступени скола, и ямки природного травления на стенках вакуоли). Указанный признак диагностики ГЖВ, по нашему мнению, является хотя и необходимым, но недостаточным для однозначной интерпретации. Этот признак более применим для идентификации поверхностей раздела по границам зерен и поверхностей изломов вдоль реликтовых микротрещин.

На рис. 5, б изображена поверхность скола природного кварца, содержащего газовой-жидкие включения. Прежде чем интерпретировать микроизображение, необходимо найти реперы, с помощью которых можно определить знак деталей микрорельефа. Такими реперами являются осколки кварца с резкой угловатой формой (на рисунке указаны стрелкой А), на которых отчетливо прослеживается направление тени.

В соответствии с этим две большие конфигурации, имеющие неправильную форму, представляют собой ямки-вакуоли, которые можно определить как часть газовой-жидких включений. На дне вакуолей, в свою очередь, наблюдаются остrokонечные ямки, которые, по Дж. Гилману, являются дислокационными. Плотность дислокаций, подсчитанная на стенке газовой-жидкого включения, совпадает с плотностью дислокаций ($1 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$), наблюдаемых с помощью дифракционного контраста в кварцевых осколках данного образца.

На поверхности скола и стенках ГЖВ присутствуют частички размером 40 нм с концентрацией $7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ (на рис. 5, б указаны стрелками Б). Эти частички нельзя диагностировать как субмикроскопические включения типа «неструктурной» примеси, так как они имеют только положительный знак микрорельефа; они также не могут быть осколками кварца, так как наши экспериментальные данные показывают, что осколки кварца таких малых размеров при разрушении кварца не образуются. Поэто-

му, как считает В. Е. Хаджи, частички следует рассматривать как сухой остаток раствора газовой-жидкой фазы чрезвычайно малой концентрации.

На субпинакоидальном сколе (рис. 6) наблюдается большое количество газовой-жидких включений размером порядка нескольких микрометров. Кроме ГЖВ на сколе присутствуют субмикроскопические включения (СВ). Ориентация скола близка к плоскости (0001) и определена по морфологическим особенностям микрорельефа (см. рис. 3, а). Возможно, газовой-жидкие включения были локализованы в одной плоскости, близкой к плоскости пинакоида, в результате чего эта область в кварцевом зерне оказалась значительно ослабленной. Газовой-жидкая фаза во включениях слабоминерализована: на поверхности скола отсутствуют следы рекристаллизации раствора, а на стенках ГЖВ их очень мало. На поверхностях некоторых вакуолей наблюдаются микрокристаллы игольчатой формы. Эти микрокристаллы являются или минералами-спутниками или дочерними минералами, так как к ним приурочены следы газовой-жидкой фазы.

На стенках газовой-жидкого включения (рис. 7, а) присутствуют дислокационные ямки травления в форме отрицательных четырехгранных пирамидок с остроконечной вершиной. Часть поверхности ГЖВ покрыта фасетками в виде параллельных плавно-изогнутых линий с узлами в вершинах дислокационных ямок. Фасетирование стенок ГЖВ снижает общую внутреннюю энергию кварцевого зерна вследствие уменьшения удельной энергии поверхности. Уменьшение удельной энергии поверхности происходит и при огранении ГЖВ. На рис. 7, б можно наблюдать грани отрицательной формы кварца: (10 $\bar{1}$ 0), (10 $\bar{1}$ 1) и (01 $\bar{1}$ 1). Несмотря на то, что стенки ГЖВ представляют собой грани простых форм, общий морфологический габитус ГЖВ является усложненным. Необходимо обратить внимание на практически чистую поверхность скола и стенок вакуолей. Это обусловлено тем, что содержимое включений представляло собой или существенно газовую фазу, или чистую Н₂О.

На рис. 8 около вакуоли ГЖВ (внизу снимка) наблюдается ореол субмикроскопических включений. Присутствие СВ в виде ореолов дисперсионного рассеяния света отмечали ряд исследователей: Г. Г. Леммлейн, Н. П. Ермаков, Э. Реддер. По данным электронной микроскопии, вдоль дислокаций, около ГЖВ, твердых включений и границ кварцевых зерен почти всегда наблюдаются цепочки и скопления СВ.

Субмикроскопические включения (см. рис. 8, стрелки А) представляют собой поры (пузырьки — *bubbles*, по английской терминологии) в виде негативных микрокристаллов размером 100 нм и менее. На рисунке можно отметить интересные особенности. Дислокационные ямки природного травления (стрелки Б) в виде отрицательных изометричных и удлиненных четырехгранных пирамидок на стенках вакуоли совпадают не только по

форме, но и по размеру с ямками — половинками пор на поверхности скола. Морфология ямок травления и пор определяется средой и структурой кварца; совпадение тех и других по размеру подлежит выяснению; в этой особенности, по-видимому, отображена какая-то важная реологическая характеристика данного кварцевого зерна. Ориентировка центральной части поверхности вакуоли и некоторые кристаллографические направления на ней были определены по ямкам травления [1]; поскольку поверхность скола приблизительно параллельна этой поверхности, мы полагаем, что и поверхность скола имеет ту же ориентировку — (1121).

Другая особенность заключается в том, что поверхность стенок вакуоли практически чистая, а продукты раскристаллизации бывшего раствора (указаны стрелками *В*) расположены на поверхности скола. Статистика наблюдений показывает, что сухой остаток может находиться либо на поверхности стенок вакуоли и поверхности скола, либо на одной из них. На поверхности ямки ГЖВ продукты раскристаллизации обычно расположены более или менее равномерно или локализованы в какой-то зоне. Можно предположить, что отсутствие сухого остатка на поверхности вакуоли обусловлено большей величиной краевого угла смачивания жидкой фазы на этой поверхности по сравнению с поверхностью скола.

На рис. 9 у дырки в реплике *А* (след ГЖВ) и у ямки *Б* раскристаллизация жидкой фазы едва заметна, а у дырок *В* и *Г* продукты раскристаллизации раствора морфологически различны и хотя обозначенные четыре ГЖВ расположены достаточно близко, состав и концентрация их газовой-жидкой фазы были различны. Поскольку расстояние в несколько микрометров между газовой-жидкими включениями *А*, *Б*, *В*, *Г* пренебрежимо мало по сравнению с объемом и временем образования самой кварцевой формации, из которой был извлечен образец, мы полагаем, что области кварца, в которых локализованы ГЖВ, *А*, *Б*, *В*, *Г* относятся к различным генерациям и отделены друг от друга не только микрометрами длины, но и годами (веками?) времени. Газово-жидкие включения, имеющие разный состав газовой-жидкой фазы, представлены на рис. 10, 11, 12. На рис. 10, *а* микрочастицы на поверхности скола расположены эпитаксиально, на рис. 10, *б* наблюдается дендритообразная раскристаллизация раствора. Микрораскристаллы размером порядка 0,2—2 мкм (см. рис. 11) имеют огранку, но форма их каплевидная, что свидетельствует о кристаллизации из пересыщенных растворов.

В соответствии с данными В. Е. Солюшкина, С. Ш. Юсупова, Е. П. Мельникова и других, предполагается, что продукты раскристаллизации, изображенные на рис. 11, представляют собой хлориды Na и K. На рис. 11, *а* буквой *А* обозначена часть ГЖВ, стрелкой *В* на рис. 11, *б* — вакуоль ГЖВ значительно меньшего размера; рядом с ней расположены микрораскристаллы *Б* (положительный знак микрорельефа). Раскристаллизация газовой-жидкой

фазы, показанная на рис. 12, а, произошла только на стенках вакуоли. Вакуоль имеет некоторую огранку, и продукты раскристаллизации раствора расположились преимущественно вдоль ребер отрицательного кристалла. Сухой остаток ГЖВ (см. рис. 12, б) расположен вдоль ступеней закола.

На дне ямки ГЖВ (рис. 13, а) наблюдаются игольчатые микрорекристаллы А и Б. Микрорекристаллы Б имеют собственную свежую поверхность скола, образовавшуюся при раскалывании кварцевого зерна по включению. Этот факт свидетельствует о том, что микрорекристаллы Б больше связаны с кварцевой матрицей, чем с газовой-жидким включением. Вследствие этого микрорекристаллы Б мы относим к минералам-спутникам, а микрорекристаллы А, свободно расположенные на дне вакуоли, — к дочерним минералам. Капли газовой-жидкой фазы находятся и на стенках вакуоли, и на поверхности скола кварца. Следует заметить, что частицы хотя и имеют каплевидную форму, не содержат воду, так как в процессе приготовления реплики образцы кварца помещались в вакуумную установку, где происходило практически полное испарение воды.

Микрорельеф поверхности частички, расположенной на дне ямки ГЖВ (см. рис. 13, б), более похож на поверхность скола, чем на поверхность граней. Поэтому мы полагаем, что наблюдаемая частичка представляет собой осколок кварца, осевший в вакуоль в процессе раскалывания образца. На некоторых стенках вакуоли наблюдается существенно шероховатая (шагреневая) поверхность, по-видимому, обусловленная эпигенетическим отложением веществ на стенках ГЖВ. Сложная система ступеней на стенках вакуолей (см. рис. 13, б) сформировалась в процессе преобразования неравновесной формы ГЖВ путем переотложения кремнезема вдоль поверхности.

На рис. 14, а общий объем сухого остатка раскристаллизованного раствора явно не соответствует объему вакуоли, расположенной в центральной части снимка и заполненной полностью этим же сухим остатком. Несоответствие может быть обусловлено двумя причинами: 1) вскрытая полость представляет собой канал, образовавшийся при расшнуровывании газовой-жидких включений, вследствие чего объем излившейся газовой-жидкой фазы может значительно превышать объем вакуоли; 2) сколом отсечена меньшая часть ГЖВ, однако разбрызгивание содержимого включения произошло преимущественно на исследуемую поверхность.

Один из образцов кварца — ядерный кварц, из пегматитов Волыни, был нагрет до температуры 800 °С. Высокая температура нагрева была выбрана для полной декрепитации всех ГЖВ. На рис. 14, б представлено одно из таких включений, претерпевшее декрепитацию. На дне вакуоли видны игольчатые монокристаллы неизвестного происхождения (отжиг существенно изменил состояние содержимого ГЖВ), погруженные в какое-то вещество. При декрепитации включения часть содержимого была

выброшена в слепую трещину, которая на снимке наблюдается в виде факела, направленного в одну сторону. Выброшенное вещество при высокой температуре, по-видимому, химически взаимодействовало с кварцем, что отразилось в микрорельефе поверхности скола, образовавшемся уже в процессе приготовления препарата.

На рис. 15 изображена вакуоль ГЖВ большого размера (проследить ее на реплике удалось на расстояние 150 мкм). Поверхность дна вакуоли и поверхность скола совершенно чистая, без каких-либо следов раскристаллизации жидкой фазы. На дне вакуоли наблюдаются остrokонечные ямки, имеющие дислокационное происхождение. Справа у края вакуоли расположено слоисто-ступенчатое включение, слева сверху также наблюдаются ступени — отпечатки на поверхности кварца от слоисто-ступенчатого включения. То, что это отпечатки, свидетельствуют ямки (указаны стрелкой), имеющие ту же ориентировку, что и дислокационные ямки на дне вакуоли. Наблюдаемое включение — вакуоль плюс слоистый минерал — можно рассматривать и как газово-жидкое включение, и как твердое включение.

Твердые включения

Существует определенная трудность (особенно на ЭМ уровне) при различении газово-жидких и твердых включений, так как минералы-спутники и дочерние являются частью многокомпонентных ГЖВ, а твердые включения, захватываемые в процессе роста, в свою очередь, непременно захватывают некоторую порцию материнского флюида, который оптически методами может быть и не замечен. Использовать классификацию Е. П. Ермакова мы также не можем, так как: а) нам неизвестны истинные размеры включения; б) в процессе приготовления реплик мы теряем газовую среду и воду; в) происходит утрата информации вследствие того, что в местах расположения включений механическая прочность реплики значительно ниже, и она часто разрывается. Поэтому разделение на газово-жидкие и твердые включения связано с определенными трудностями; тем не менее такое разделение нам необходимо для обозначения изучаемых объектов.

При раскалывании кварца, содержащего твердые включения, могут возникать следующие случаи, требующие определенного конкретного подхода при диагностике включений.

1. Включение раскололось на две половинки, которые остались на двух зеркально-сопряженных поверхностях скола кварца. В этом случае тип включения легко определяется по морфологическим особенностям поверхностей скола включения. Кроме этого, если извлечь включение на реплику, то с помощью микроанализа можно получить данные о вещественном составе включения.

2. Включение извлекается на изучаемую поверхность скола, а на удаляемой части скола от включения остается ямка. Идентификация включения в этом случае не вызывает затруднений, и кроме этого имеется возможность использования микроанализа.

3. Включение извлекается на удаляемую поверхность скола, а на изучаемой поверхности от включения осталась ямка. Диагностика включения в этом случае затруднительна, поэтому необходимо использовать дополнительные данные. Во-первых, должна быть увеличена статистика наблюдений, так как извлечение твердого включения на ту или иную поверхность скола имеет одинаковую вероятность. Во-вторых, проводится прямое изучение данного образца с использованием дифракционного контраста.

При изучении зерен обломочного кварца Г. Г. Леммлейн [5] выделил следующие типы твердых включений: игольчатые, пластинчатые и изометрические. В свою очередь мы подразделяем твердые включения на сухие и содержащие жидкую фазу: на идиоморфные, состоящие из одного микрокристалла, и агрегатные, состоящие из нескольких микрокристаллов.

На поверхностях сколов кварца (рис. 16, а, б, в) представлены твердые включения, имеющие округлую форму. Согласно литературным данным [9, 11], такие включения представляют собой мельчайшие капельки застывшего расплава, который сохраняется в дальнейшем либо в виде стекла, либо подвергается процессам раскристаллизации. Необходимо обратить внимание на отсутствие полостей или каверн между включениями и матрицей, а также следов жидкой фазы. Форма сечения включения, изображенного на рис. 16, а, почти круглая, в морфологии поверхности скола проявляется внутренняя неоднородность, поэтому мы его идентифицируем как включение стекла. В характере занозистости микрорельефа скола включения на рис. 16, б проявляется некоторая кристалличность, сечение включения на поверхности скола кварца округлое, поэтому мы его определяем как стекловатое, частично раскристаллизованное. Следует обратить внимание на ступеньку закола, начинающуюся на включении. Ступени закола, впервые обнаруженные В. И. Васильевым на кварце, содержащем дефекты, наблюдаются почти всегда и их можно использовать для поиска очень малых включений, границ зерен, двойников. Около ступеней закола часто происходит отщепление кварцевых волокон; ступени всегда расположены только с одной стороны дефекта и показывают направление распространения трещины: она распространяется в сторону выклинивающего конца ступени.

Очень интересное включение изображено на рис. 16, в. Оно представляет собой стекловатое включение, имеющее четкие признаки раскристаллизации: с правой стороны наблюдаются четыре хорошо ограненных микрокристаллика. Микрорельеф остальной части скола характеризует неоднородность стеклооб-

разного вещества, по-видимому, вызванного его ликвиацией при остывании. На этом включении два закола расположены с противоположных сторон включения, что может показаться противоречием факту одностороннего расположения заколов. Однако на рис. 16, *г* отчетливо видно, что закол, расположенный внизу данного включения, генерирован на другом включении, расположенном слева.

На рис. 17, *а* представлено твердое включение, часть которого полностью присутствует на сколе (она показана стрелкой А), а другая часть расколота. На поверхности скола вдоль включения наблюдается ступенька, которая может представлять собой след двойниковой или межкристаллитной границы. Мы полагаем, что включение на рис. 17, *а* двухфазное: центральную часть его занимает микрокристалл удлиненной формы, а облочка включения представляет собой стеклообразное вещество. Включение на рис. 17, *б* расколота вдоль поверхности скола кварца. Микрорельеф скола твердых включений морфологически отличается от микрорельефа поверхностей сколов кварца (см. рис. 2, 3, 4). Кроме этого, микрорельефы поверхностей сколов твердых включений на рис. 17 различаются между собой и это свидетельствует о различном вещественном составе включений. Следы газовой-жидкой фазы в окрестности обоих включений отсутствуют.

Наличие стекловатых включений В. Е. Солюшкин [11] в соответствии с общепринятыми представлениями предложил использовать в качестве признака магматического происхождения кварца. Авторы для этой же цели предлагают использовать еще один признак: отсутствие газовой-жидкой фазы около вскрытых твердых включений. Кроме этого, если предположить, что в магматическом кварце присутствуют хорошо ограненные включения, то, очевидно, они образовались до кристаллизации кварца и представляют собой минералы-спутники.

На рис. 18 представлены два твердых слоистых включения. Необходимо обратить внимание на заклы и интенсивное отщепление кварцевой матрицы. Следы газовой-жидкой фазы отсутствуют.

В синтетических кристаллах кварца затравочная пластинка обычно хорошо видна невооруженным глазом [10]. Эффект видимости обусловлен рассеянием света на микрочастицах, расположенных на «поверхности» затравочной пластинки. Для выяснения природы микрочастиц их изучали методом электронной микроскопии. Применялись прицельные реплики и прицельное раскалывание, которое заключалось в том, чтобы, используя методику ориентированного раскалывания, расколоть образцы кварца точно вдоль «поверхности» затравочной пластины. Было показано, что частицами, на которых происходит рассеяние света, могут быть газово-жидкие и различные твердые включения. Один из таких типов твердых включений представлен на рис. 19. Темный контраст некоторых включений означает, что они извле-

чены на реплику. Определение элементного состава этих включений проводилось на электронном микроскопе ЕМ-100СХ, оборудованном приставкой для рентгеновского энергодисперсионного микроанализа KEVEX-5100 в лаборатории электронной микроскопии ИГЕМ АН СССР. Результаты изучения показали, что включения, в основном, состоят из кремния, железа и натрия. Приблизительное процентное содержание элементов оценено следующим образом: Si — 50, Fe — 25, Na — 20—25.

В соответствии с этими результатами, а также на основе данных Е. М. Цыганова, Ж. В. Новожиловой твердые включения были идентифицированы как минерал акмит.

На рис. 20, а изображено слоистое твердое включение в природном кварце. Часть включения (внизу справа) извлечена на реплику. Об этом свидетельствуют темные плавно изогнутые линии, представляющие собой экстинкционные полосы изгиба. Темный сплошной контраст обусловлен наложением части включения на платиноугольную реплику. Область А представляет собой поверхность скола кварца, а область Б — поверхность излома по межфазной границе включение — кварц. По кромке извлеченной части включения произошло растворение (отделение реплики производилось в плавиковой кислоте). В окрестности твердого включения присутствуют отдельные субмикроскопические включения. На извлеченном твердом включении был проведен микроанализ в лаборатории ИГЕМ АН СССР. Были обнаружены следующие элементы: Al, K, Si. В соответствии с этим, а также согласно данным микродифракционных изображений включений было диагностировано как минерал мусковит.

Микрорельеф поверхности скола твердого включения (см. рис. 20, б) четко отличается от кварцевой матрицы. На поверхности скола включения наблюдаются субмикроскопические включения и следы газовой-жидкой фазы (указаны стрелкой). По отдаленности этих следов от межфазной границы кварц — включение можно предполагать, что газовой-жидкая фаза содержалась в ГЖВ твердого включения.

В процессе раскалывания твердое слоистое включение было извлечено на реплику и смещено в сторону (рис. 21). Кромки агрегатного включения, как и на рис. 20, а, слегка протравлены, но на реплике отчетливо видны ступени роста. Если предположить, что твердое включение — мусковит, то высота отдельных ступеней должна быть 0,996 нм. Интересно отметить присутствие декорирующих частиц неизвестной породы у кромки твердого включения и на его ступенях (указаны стрелками), размер которых на порядок превышает высоту ступеней. Несколько необычен контраст на ступенях одного включения, закрытого другим, лежащим на нем включением, от которого осталась только реплика, а само оно растворено в HF. Необходимо особо отметить ювенильную чистоту поверхностей включения и существование тончайших ступеней роста; эти два фактора могут служить признаком определения вторичности включений. Если бы включе-

ние существовало в маточном растворе, то его поверхность неизбежно покрылась бы пленкой загрязняющих веществ, а так как они отсутствуют, можно полагать, что данное включение кристаллизовалось в небольшом замкнутом объеме и является дочерним включением. Тончайшие ступени роста наблюдаются и на другом слонстом включении (рис. 22, а), вследствие чего мы его также определяем как дочернее включение.

Агрегат твердых включений на рис. 22, б по морфологическому признаку, в соответствии с данными Г. С. Грицаенко и др. [6], мы диагностируем как минерал галлуазит. Уникальные условия роста галлуазита в замкнутом объеме позволяют выявить тончайшие его особенности.

На рис. 23, а представлено твердое включение в виде агрегата мелких слоистых минералов. На поверхности скола включения и на поверхности скола кварца наблюдаются отдельные капли и очень тонкая сыпь (шагреневая поверхность). Можно предположить, что в вакуолях самого твердого включения находились растворы различного состава и концентрации. Твердые включения, изображенные на рис. 23, б, в соответствии с критерием гранной формы мы определяем как минералы-спутники. Включение, расположенное слева, выделено неразрушенным на поверхность скола, а сросток твердых включений, расположенный справа, расколот вдоль поверхности скола кварца.

На рис. 24 изображены два твердых включения: минерал-спутник и агрегат пластинчатых минералов. Включение на рис. 24, а расколото по плоскости спайности. Тонкая скульптура ступеней скола на включении четко отличается от микрорельефов поверхностей скола кварца и от поверхностей изломов по межкристаллитным границам. Твердое включение на рис. 24, б представляет собой агрегат пластинчатых минералов. Сухой остаток окаймляет площадь на поверхности скола кварца, которую занимал исходный раствор в момент вскрытия включения.

На рис. 25, а представлен сложный случай диагностики. Вскрытые включения можно рассматривать и как газово-жидкие включения, содержащие или минералы-спутники, или дочерние минералы, и как твердые включения, захватившие некоторое количество материнского раствора. Капли раствора на поверхности скола кварца расположены только в углублениях, образованных ступенями заколов. На сколе также присутствуют субмикроскопические включения в виде ямок от пор. Необходимо обратить внимание на отсутствие капель раствора на ступенях слоистого включения, обусловленное тем, что краевой угол смачивания раствора на включении больше, чем на кварце. Влияние краевого угла смачивания на рис. 25, б проявляется в характере расположения сухого остатка газово-жидкой фазы: на поверхности скола кварца и стенок вакуоли частицы распределены более или менее равномерно, а на включении частицы расположены цепочками у кромок и островками на плоских поверхностях. Поскольку другие вещества, загрязняющие поверхность

включения, отсутствуют, и наблюдаются ступени роста, то агрегат пластинчатых кристаллов в соответствии с критерием чистоты мы определяем как дочерний минерал.

На рис. 26 изображена поверхность скола голубого вкрапленника кварца из гравелитов. На поверхности скола наблюдаются извлеченные хорошо ограненные игольчатые микрокристаллы субмикроскопических размеров. Диагностика включений производилась по микродифракционным картинам, одна из которых приведена на врезке слева. Точечная картина микродифракции соответствует плоскости обратной решетки ($1\bar{1}0$) рутила TiO_2 (тетрагональная сингония. Пр. гр. $P4_2/mnm$, $a_0 = 0,459$ нм, $c_0 = 0,296$ нм).

Отметим интересную особенность голубой окраски вкрапленников кварца. Визуально микроскопические включения рутила выглядят как длинные тонкие красновато-бурые или желтые иглы, или волосы. У нас нет никаких оснований полагать, что субмикроскопические включения рутила имеют другой цвет, поэтому голубой цвет вкрапленников кварца (на отражение) обусловлен только рассеянием света на частицах субмикроскопических размеров.

Данные оптических исследований показывают, что очень часто твердые включения располагаются вдоль границ кварцевых зерен [8]. Включения, локализованные на границах, находятся в иных условиях, чем интеркристаллические, так как границы зерен обладают некоторой проницаемостью, вследствие чего происходит утечка содержимого включения и их можно рассматривать как разгерметизированные [9]. Поэтому отсутствие следов раскристаллизации жидкой фазы может служить признаком определения места расположения твердых включений на границах зерен. Однако этого недостаточно, и дополнительным признаком является протяженность межзерновой границы, которую можно проследить на расстояние до нескольких сотен микрометров в соответствии с размером кварцевого зерна.

На рис. 27 представлены включения на границе кварцевых зерен, расположенных параллельно плоскости изображения. Изометрические включения размером $0,1\text{—}5$ мкм имеют несовершенную огранку, однако по скульптуре поверхностей граней и штриховке на гранях можно легко установить, что, во-первых, твердые включения представляют собой микрокристаллы кварца, и, во-вторых, они расположены строго ориентированно в одном направлении (на снимке указано направление оси C кварца твердых включений). Мы предполагаем, что микрокристаллы кварца образовались вследствие дробления (будинажа) кварцевой породы вдоль крупной трещины, пересекающей эту породу, и последующего переотложения кремнезема в зоне дробления. Можно также предположить, что микроизображение (см. рис. 27) отображает один из моментов процесса преобразования кварцевой породы в гранулированный кварц. Часть поверхности ско-

ла в окрестности вскрытой межкристаллитной границы имеет грубый раковистый и ручьево́й микрорельеф. На этой же поверхности скола можно проследить чистую границу зерен без твердых включений в виде тонкой извилистой линии (указана стрелками), а также субмикроскопические включения. На рис. 28, а твердые включения размером 5—10 мкм локализованы на границе зерен, расположенной параллельно, а на рис. 28, б — перпендикулярно плоскости изображения. Включения А выделены на поверхность скола и на них можно отчетливо проследить грани, а включение Б расколото вдоль поверхности скола. На поверхностях некоторых включений имеются следы природного травления и примесные вещества. Межзерновая граница на рис. 28, б, содержащая твердые включения, перпендикулярна поверхностям сколов двух кварцевых зерен. Включения вдоль границы расположены неравномерно. Необходимо обратить внимание на большое количество пустот на межзерновой границе и отсутствие следов жидкой фазы на поверхностях сколов (частицы 20—50 нм — это субмикроскопические включения).

Как уже отмечалось, неоднозначность понятий «твердое включение» и «газово-жидкое включение» отражает обширное варьирование условий образования этих дефектов от существенно твердых до существенно газовой-жидких. Поскольку при изучении кварца твердые и ГЖВ включения играют важную роль, нам представляется целесообразным построить следующую логическую цепочку анализа этих дефектов.

1. Определение характера неоднородности: возвышение или ямка.

2. Возвышение — твердое включение.

3. Ямка: а) образовалась от выпавшего твердого включения; в этом случае вакуоль представляет собой ограниченный отрицательный полукристалл, на поверхности которого отсутствуют ямки природного травления и фасетки (отдельные ямки могут наблюдаться, однако размер их очень мал); б) ямка — вакуоль является отсеченной сколом частью ГЖВ; главными признаками этого определения служат большое количество ямок природного травления и фасетирование поверхности; в качестве дополнительного признака принадлежности дефекта к ГЖВ может служить наличие сухого остатка на дне вакуоли и в окрестности ее (если газово-жидкая фаза представляла собой углекислоту или воду, то продуктов раскристаллизации может и не быть).

Очень большое значение имеют тонкие особенности строения твердых и газовой-жидких включений.

1. Субмикроскопические включения (СВ), локализованные на твердых и газовой-жидких включениях. Размер, концентрация и морфология СВ. По морфологическому габитусу СВ можно установить ориентацию поверхности скола.

2. Наличие минералов-спутников и дочерних минералов. Характер их расположения, разрушение при раскалывании образца, особенности сухого остатка газовой-жидкой фазы.

3. Распределение сухого остатка (СО) по поверхности: а) СО расположен на дне вакуоли; б) СО — на дне вакуоли и на поверхности скола; в) СО — только на поверхности скола кварца.

Субмикроскопические включения и поры

При оптическом изучении зерен обломочного кварца Г. Г. Леммлейном и В. С. Князовым [4] было сделано предположение, что опалесценция обусловлена рассеянием света на субмикроскопических включениях, невидимых в световом микроскопе. Авторы отметили, что в проходящем свете зерна опалесцирующего кварца совершенно прозрачны и имеют только слегка буроватую окраску, обусловленную дисперсионным эффектом. Опалесценция вызвана субмикроскопическими «ближе неопределимыми включениями».

В дальнейшем опалесценция была обнаружена в синтетических кристаллах кварца, выращенных в гидротермальных условиях. В. Е. Хаджи было показано, что опалесценция вызывается субмикроскопическими агрегатами, проявляющими аномальные свойства по сравнению со структурными примесями и механически захваченными частицами. Вследствие этого субмикроскопические агрегаты получили название «неструктурной примеси» (НП). Кристаллы кварца, содержащие НП, обладают Тиндаль-эффектом, могут быть бесцветными, а также окрашенными в бурый, зеленый, голубой и желтый цвета. Было высказано предположение, что синяя и зеленая окраски кварца связаны с коллоидально-дисперсными включениями силикатов кобальта и железа, а бурая окраска обусловлена мелкодисперсной фазой силикатов железа, а также интерстициальными ионами Fe^{3+} . Если кристаллы кварца с неструктурной примесью подвергнуть отжигу при температуре 600—800 °С, то они необратимо мутнеют, причем у бурых кристаллов происходит изменение первоначальной окраски на зеленую. С помощью методов ЭМ И. П. Хаджи, В. Е. Хаджи было показано, что в отожженных кристаллах частицы НП отсутствуют, а наблюдаются пустотки (глобулы) изометрической (близкой к шарообразной) формы размером 0,03—0,1 мкм с плотностью распределения $(7,6—8,0) \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$.

Трансформация частиц НП в поры (пустотки) совершается путем сложного многостадийного преобразования: коалесценция нескольких частиц в одну → растрескивание новообразованных агрегатов по плоскостям трех основных ромбоэдров кварца $\{10\bar{1}1\}$ → преобразование микротрещины в пору сферической формы → ограничение поры. Поскольку включения НП мигрируют в структуре кварца как единые целостные системы, этот механизм трансформации мы называли миграционным.

Другой, диффузионный, механизм образования пор был впервые обнаружен А. Мак-Лареном и Р. Фейки при электронно-микроскопическом изучении отожженных кристаллов природ-

ного аметиста. Авторы показали, что ОН-группы, повышенное содержание которых характерно для аметиста, вследствие гидролиза связей образуют молекулы воды $\text{Si}-\text{OH}\cdot\text{HO}-\text{Si} \rightarrow \text{Si}-\text{O}-\text{Si}+\text{H}_2\text{O}$, которые диффундируют в структуре кварца и коалесцируют с образованием газовых пузырьков (*bubbles*).

Преобразование первоначальных включений при воздействии на минеральные объекты различных природных факторов Э. Реддер [9] определил как «экссолуционные» изменения включений.

Изучение свойств частиц НП авторами проводилось следующим ЭМ способом: на свежих сколах с помощью платиноугольных реплик и в режиме просвечивания с использованием дифракционного контраста и высокоразрешающей ЭМ тончайших кромок кварцевых осколков, приготовленных путем дробления. При этом необходимо отметить преимущество изучения частиц НП в осколках по сравнению с изучением их в препаратах, приготовленных путем ионного утонения, так как в последнем случае НП уничтожаются в самых тонких частях фольги.

На репликах частицы НП изображаются в виде бугорков и ямок четырех типов (рис. 29):

1) четкие оконтуренные бугорки (стрелки А); 2) четко оконтуренные ямки (стрелки В); 3) размытые нечеткие бугорки (стрелки Б); 4) размытые нечеткие ямки (стрелки Г). Четкие изображения дефектов получаются в том случае, когда скол проходит по частицам НП. Если частицы НП находятся на некотором удалении от поверхности скола, то они проявляются в микрорельефе скола в виде размытых бугорков и ямок. Когда частица присутствует на изучаемом сколе, то наблюдается бугорок, когда на удаляемом сколе — ямка. Фрактографическая визуализация частиц НП, находящихся на некотором расстоянии от поверхности скола (по нашим оценкам, это расстояние в 2—5 раз превышает размер частиц НП), может быть обусловлена двумя факторами: либо наличием деформационных напряжений около частиц, либо тем, что вещество, окружающее их, по механическим свойствам отличается от вещества матрицы.

На рис. 30 представлено изображение пор на реплике и в осколке в отожженном синтетическом кварце.

Для высокоразрешающей электронной микроскопии кварц представляет собой очень трудный объект исследования, так как при облучении кварца электронами происходит метамиктное превращение кристаллического кварца в стекло. Превращение сопровождается увеличением первоначального объема на 14 %, в результате чего происходит деформация и дрейф препарата. Кроме этого, аморфизация начинается на поверхности и на дефектах, в первую очередь, на частицах неструктурной примеси. На рис. 31, 32 представлено прямое изображение частиц НП в зеленом, буром и голубом кварце. Размер частиц варьирует в пределах 4—6 нм в буром кварце, 5—30 нм — в голубом и 5—20 нм — в зеленом.

Ранее при изучении с помощью платиноугольных реплик, частиц НП в зеленом кварце на некоторых включениях неотчетливо проявлялась огранка. При прямом изучении НП с помощью высокоразрешающей микроскопии огранку частиц можно наблюдать непосредственно (см. рис. 31, а и 33). Темная и светлая окраски частиц обусловлены сложным взаимодействием рассеяния электронов в матрице и зависят главным образом от соотношения экстинкционного расстояния и глубины залегания дефекта. На некоторых частицах наблюдается полосчатый контраст, который представляет собой муар наложения решеток кварца и твердого включения. На одном включении получено высокоразрешающее изображение решетки (см. врезку на рис. 31, а). Семь темных двойных полос не являются муаром наложения, так как линии имеют резкие очертания. Размер включения $17,5 \times 9,5$ нм, расстояние между плоскостями 1,6 и 1,2 нм. Учитывая, что в зеленом кварце наблюдается повышенное содержание трехвалентного железа, можно полагать, что твердые включения в этом типе кварца — силикаты железа.

Изучение частиц НП в буром кварце вследствие их очень малого размера чрезвычайно трудно. Если частица представляет собой твердое включение, то на изображении, сформированном дифракционным контрастом, расстояние между полосами муара наложения решеток матрицы и включения должно превышать их размер, и муар наблюдаться не будет. Основная информация, характеризующая природу включений, получена на частицах НП, оказавшихся на краях осколков (см. рис. 31, б). На этих краях наблюдаются пустотки (показаны стрелками А), которые можно идентифицировать и как газово-жидкие включения, утеравшие содержимое в колонне электронного микроскопа, и как полости от выпавших твердых включений. Однако довольно часто на тех же краях присутствуют частички (показаны стрелками Б), которые можно уверенно определить как твердые включения. В голубом кварце частицы НП имеют округлую форму (см. рис. 32, а). В них наблюдается неоднородный пятнистый контраст, свидетельствующий о гелеобразном или жидкоподобном состоянии вещества, содержимого включения. В некоторых частицах пятна темного контраста имеют четкую круглую форму (показаны стрелкой) и их можно интерпретировать либо как пузырьки газа, либо как отсеченные сколом части включения. Данных, свидетельствующих о твердом состоянии частиц НП в голубом кварце, нами не получено, поэтому мы полагаем, что эти включения газово-жидкие.

При облучении кварца электронами происходит не только быстрая аморфизация кристаллического кварца, но и преобразование, и исчезновение включений. Мы не можем установить температуру этих изменений, но вполне уверенно можем считать, что она ниже 573°C . По-видимому, температура преобразования и температура начала коалесценции частиц НП одна и та же и является температурой гомогенизации включений, выше кото-

рой они становятся способными, по данным Г. Г. Леммлейна, к перемещению в кристаллической матрице. На рис. 32, б представлено высокоразрешающее изображение решетки бурого кварца плоскости $(\bar{1}2\bar{1}3)$ * спустя 1 мин после начала наблюдения. Можно заметить, что в аморфной матрице отсутствуют какие-либо следы от включений, причем, если в начале наблюдения на краях кварцевых осколков существовали пустотки, то в процессе аморфизации произошло выравнивание кромок. На рис 33 изображена кристаллическая решетка зеленого кварца, плоскость которой близка к $(10\bar{1}1)$. Съемка произведена спустя 15с после начала наблюдения, поэтому произошла некоторая аморфизация областей кварца, прилегающих к включениям. Как-ких-либо дефектов или искажений кристаллической решетки в окрестности включений не обнаружено, поэтому можно полагать, что далекодействующий эффект выкалывания, когда частица проявляется в микрорельефе скола, находясь на некотором удалении от него, обусловлен деформационными напряжениями около включений.

Таким образом, при изучении с помощью высокоразрешающей микроскопии синтетических кристаллов кварца, содержащих неструктурную примесь, показано, что включения в различных сортах кварца имеют различную природу и могут быть твердыми и газовой-жидкими. Все эти включения — и по данным ИК-спектров поглощения, и по ЭМ наблюдениям, и по преобразованию включений — содержат СН-группы. В связи с этим необходимо сделать замечание, связанное с недоразумениями в зарубежной литературе, посвященной вхождению воды в кварц. Дело в том, что вода, содержащаяся в неструктурной примеси, отличается от воды (ОН-группы), входящей в структуру кварца. За рубежом проводится корреляция многих механических и физических свойств кварца в зависимости от содержания воды в кварце, пренебрегая тем обстоятельством, в каком виде она входит в кварц. Например, в опытах по деформированию кварца Д. Григгзом было обнаружено новое явление гидролитического ослабления синтетического кварца, т. е. снижение прочности этого кварца примерно в 100 раз по сравнению с природным кварцем. Это снижение прочности было связано с повышенным содержанием водорода в кварце, хотя ИК-спектр поглощения очень похож на ИК-спектр кварца с неструктурной примесью.

Термин «неструктурная примесь» впервые был введен Л. И. Цинобером и в свете последних данных электронной микроскопии и оптической спектроскопии по изучению вхождения воды в кварц представляется удачным. Однако мы считаем целесообразным использовать и термин «субмикроскопические включения» (СВ) как более общее понятие.

В образцах природного кварца статистически равномерно распределенные субмикроскопические включения размером 5—200 нм практически не встречаются; только в образцах кварца

редкометалльно-пегматитовой формации наблюдалось статистически равномерное распределение включений с плотностью распределения 10^4 — 10^5 см⁻¹ размером 20—30 нм. Субмикроскопические включения в природном кварце распределены очень неравномерно; они, как правило, локализованы в виде ореолов и облаков около включений, микротрещин, границ раздела кварцевых зерен. В препаратах, приготовленных для изучения с помощью просвечивающей ЭМ, субмикроскопические включения (особенно размером 5—10 нм) встречаются очень редко, поэтому основные результаты получены с помощью платиноугольных реплик.

На рис. 34 представлено изображение пор в природном кварце. Поры, расположенные на сколе, соответствующем плоскости (0001), имеют форму положительных и отрицательных микрокристаллов гексагональной формы (стрелка указывает направление оттенения); на некоторых из них можно различать грани положительного ($10\bar{1}1$) и отрицательного ($01\bar{1}1$) ромбоэдров. По-видимому, поры были локализованы в одной плоскости вследствие чего и произошло разделение кварцевого зерна вдоль этого ослабленного места при раскалывании образца. Несколькими странным является присутствие на сколе включений с положительным характером микрорельефа. Их можно было бы интерпретировать как твердые включения, однако на некоторых включениях можно отметить частично нарушенные оболочки, облегающие стенки пор неизвестного вещества. В верхней части снимка они, как мыльные пузыри, хотя и имеющие огранку, возвышаются над поверхностью скола. На врезке представлена оптическая фотография пор той же кристаллографической ориентировки, что и на рис. 34.

На рис. 35 изображены скопления пор и субмикроскопических включений, расположенных вдоль залеченных трещин. Предположительно поверхности сколов соответствуют плоскостям кварца ($10\bar{1}1$) (рис. 35, а) и ($11\bar{2}1$) (рис. 35, б). Залеченные микротрещины расположены нормально к поверхности скола. Интересно отметить, что поры и субмикроскопические включения распределены в некоторой области около трещины. Мы объясняем это тем, что процессу залечивания предшествовало проникновение флюидов, вызывающих коррозию кварца, в результате чего в трещинах образовались объемные полости. Залечивание этих полостей и привело к пространственному расположению включений.

На рис. 36, а субмикроскопические включения, по-видимому, также локализованы на залеченной трещине. Они распределены на площади в несколько квадратных микрометров, поэтому мы полагаем, что залеченная трещина параллельна плоскости изображения.

Изображение твердых включений субмикроскопических размеров по огранке и картине микродифракции было идентифи-

цировано как иголки рутила (см. рис. 26). Твердые включения неопределенной формы на рис. 36, б мы определяем просто как субмикроскопические, так как вещество включений не было диагностировано. На снимке видны зоны выкалывания положительного и отрицательного характера при расположении включений под поверхностью скола. Интересно отметить, что ступеньки скола образуются только тогда, когда скол проходит точно по дефекту.

ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА КВАРЦА

При фрактографическом изучении поверхности сколов кварца совершенно четко отличаются от поверхностей изломов по границам кварцевых зерен. Наиболее часто встречающимися типами сколов являются ручьевого и раковистый (см. рис. 2). В кварцевых и кварцосодержащих породах эти типы сколов являются как бы «визитной карточкой» кварца, так как по ним можно уверенно определить кварц как минерал.

Поверхности изломов образуются в том случае, когда вскрываются границы зерен, субграницы и реликтовые микротрещины (палеомикротрещины). Границы зерен представляют собой области в поликристаллическом минеральном агрегате, через которые могут циркулировать флюиды, происходят процессы перетолжения кварца, перекристаллизация твердых включений, расположенных вдоль границ, отложения тонкодисперсного вещества. Для отличия этих границ от других мы их называем «межзерновые границы». Существуют границы зерен, так называемые «межкристаллитные границы», которые почти непроницаемы для нейтральных флюидов, а механические свойства кварцевых пород, зерна в которых разделены межкристаллитными границами, определяются, главным образом, свойствами вещества, локализованного на этих границах. Однако, если флюид взаимодействует с кварцем, то преимущественное растворение кварца происходит вдоль межкристаллитных границ. В трещинах кварцевых зерен также происходят процессы перетолжения вещества.

В соответствии с изложенным поверхности раздела мы классифицировали на три группы: межкристаллитные границы, межзерновые границы, реликтовые микротрещины.

Межкристаллитные границы

Межкристаллитными границами называются такие границы раздела между зернами-кристаллитами, на которых локализованы структурные дефекты, эквидистантно (периодически) расположенные вдоль границ: решетчатые дислокации на малоугловых границах, зернограницные дислокации и 0-элементы на боль-

шеугловых границах. Вследствие атомарного контакта сцепление между зернами по монокристаллитным границам очень прочное, однако прочность по границам зерен несколько меньше прочности монокристалльного кварца, и разделение зерен при дезинтеграции кварцевой породы часто происходит по межкристаллитным границам.

С помощью фрактографии межкристаллитные границы были впервые обнаружены в скрытокристаллических разновидностях кремнезема на поверхностях индукционных граней. На поверхностях изломов наблюдался микрорельеф с периодическим расположением ступеней в виде параллельных линий и сеток, совершенно отличный от полосчатого и сетчатого микрорельефа скола кварца. Первоначально микрорельеф такого типа трактовался как свободнорастущая поверхность кварца. Однако впоследствии были накоплены факты, свидетельствующие о том, что на кварце и других минералах межкристаллитные границы обладают особым свойством, при котором расположение зернограницных дислокаций и других элементов межкристаллитных границ при интеркристаллитном распространении трещины воспроизводятся в расположении элементов микрорельефа поверхности излома ступеней, бороздок, канавок [15].

Благоприятными модельными объектами, по данным А. Ф. Свириденко и других, для изучения межкристаллитных границ оказались льдистый кварц и гранулированный кварц [2]. Это исключительно уникальные кварцевые породы, претерпевшие высокую степень метаморфизма (от эпидот-амфиболитовой до гранулитовой и эклогитовой). В образцах льдистого кварца, взятых из центральной части тела, по данным оптической микроскопии и просвечивающей электронной микроскопии кроме дислокаций и межкристаллитных границ не наблюдается никаких других дефектов и включений. Одиночные дислокации, заключенные в объеме кварцевых зерен, так называемые решеточные дислокации, не оставляют никаких следов на поверхности скола, как бы велика не была их концентрация.

Светлопольное изображение дислокационной сетки, представляющей собой межкристаллитную малоугловую границу вращения в льдистом кварце (рис. 37, а), получено с помощью дифракционного контраста. Препарат приготовлен путем утонения ионами аргона петрографического шлифа. На другом рисунке (37, б) видна сетка ступеней на поверхности излома по межкристаллитной границе. Несмотря на то, что оба изображения были получены физически различными способами, они геометрически подобны.

Очень хорошими реперами являются поры, локализованные на межкристаллитных границах. Поры в поликристаллическом кварце — это обычное явление; они могут присутствовать в объеме кварцевых зерен и на их границах. На рис. 38 представлены поверхности сколов по объему кварцевых зерен. Межкристаллитные границы расположены почти перпендикулярно поверх-

ности скола, наблюдаются поры, расположенные в объеме кварцевых зерен (одна из них указана стрелкой *А*), на их границах (стрелка *Б*) и на тройном стыке трех зерен (стрелка *В*). Все поры огранены, и все они имеют равновесную форму, соответствующую их месту расположения в кварцевой породе. Пора в объеме кварцевого зерна имеет изометричную форму, на межкристаллитной границе — уплощенную, а на тройном стыке — треугольную. Границу, расположенную под углом к поверхности скола, или перпендикулярную ему, наблюдать довольно трудно, так как она представляет собой очень тонкую линию. Однако вследствие того, что межкристаллитные границы почти всегда «декорированы» цепочкой пор и периодически расположенными заколами (рис. 39), их можно проследивать на расстояние 1—2 мм (периодическое расположение заколов, приуроченных к межкристаллитной границе, можно определить как фрактografическое декорирование).

При раскалывании гранулированного кварца вдоль межкристаллитной границы поры, локализованные на ней, разделяются на две половинки, которые в виде ямок остаются на зеркально-сопряженных поверхностях излома (рис. 40, 41). В местах расположения пор контакт кварцевых зерен отсутствует, отсутствует и дислокационная сетка. Поры размером 0,2—2 мкм огранены, и в соответствии с этой огранкой можно полагать, что ориентировка межкристаллитной границы соответствует плоскости (10 $\bar{1}$ 1). В объеме пор содержалась газово-жидкая и твердая фазы: следы раскристаллизации жидкой фазы наблюдаются и на стенках пор, и на поверхностях изломов. На рис. 40 стрелкой *А* указана пора, стрелкой *Б* — капля «раствора». Необходимо отметить, что в льдистом кварце, претерпевшем стадию раскристаллизации, в объеме пор, локализованных на межкристаллитных границах, какие-либо следы газово-жидкой фазы вообще отсутствуют. Гранулированный кварц (см. рис. 40, 41) отличается от льдистого кварца тем, что перекристаллизация исходной породы происходила с участием водных растворов. При случайном совпадении ориентационных соотношений пар кварцевых зерен между ними формировались межкристаллитные границы. Вполне естественно допустить, что порции водного раствора могли быть захвачены порами, локализованными на этих границах. Отсюда следует, что наличие газово-жидкой фазы в порах может служить признаком перекристаллизации. На рис. 42 поверхности скола перемежаются с поверхностями излома по межкристаллитной границе, на которой локализованы поры. Это чередование обусловлено тем, что кварцевые зерна имеют сложную форму, а наблюдаемая поверхность представляет собой сечение поликристаллического агрегата.

В образцах природного кварца иногда наблюдаются межкристаллитные границы, на которых в расположении ступеней не отмечается строгой периодичности; кроме этого, расстояние ме-

жду ступенями значительно больше (рис. 43, а). На рис. 43, б представлена поверхность скола синтетического кристалла кварца, состыкованного В. Е. Хаджи из двух половинок по плоскости $(11\bar{2}0)$. Состыковка этих половинок производилась с чрезвычайно высокой точностью, благодаря чему разориентация на искусственно изготовленной межкристаллитной границе составляла несколько секунд. Микрорельеф этой границы аналогичен микрорельефу границы, представленной на рис. 43, а. Поэтому мы полагаем, что границы, изображенные на рис. 43, б, имеют очень малую разориентировку.

При исследовании деформационных минералов неоднократно отмечалось своеобразное распределение пор, панизанных на дислокации [3]. На рис. 44 наблюдаются две системы ступеней имеющих различную высоту, и к которым приурочены ямки — поры также двух размеров. Мы предполагаем, что ступени большей высоты являются реликтами решеточных дислокаций, а ступени меньшей высоты отвечают реликтам зернограницных дислокаций.

На рис. 45 представлено изображение поверхности скола с периодически расположенными ступеньками, которое может быть ошибочно интерпретировано как изображение поверхности излома по межкристаллитной границе. Однако наблюдаемый микрорельеф имеет совершенно иное происхождение. Здесь изображена часть вещества кварцевого осколка, которое было растерто между стенками трещины вследствие их тангенциального смещения. Периодическое расположение вещества обусловлено колебаниями упругой среды на стенках трещины. Эти факты свидетельствуют об образовании кварца рассматриваемой формации в стрессовых высокобарических условиях дислокационного метаморфизма, а систематическое наличие межкристаллитных границ с описанным микрорельефом поверхности — об отличительной особенности деформированного метаморфогенного кварца тектонически подвижных зон. Также можно ошибочно интерпретировать расположенные цепочкой элементы микрорельефа с кварцевыми заколами, приуроченными к ним, как межкристаллитную границу, расположенную под некоторым углом к поверхности скола и декорированную цепочкой пор (рис. 46, а).

На самом деле эти элементы микрорельефа являются микрокристаллами, расположенными вдоль ступени скола, и представляют собой следы раскристаллизации жидкой фазы, излившейся из находящегося поблизости вскрытого газовой-жидкого включения. Это подтверждается цепочкой микрокристаллов в левой части снимка, расположенных явно вдоль отцеженного кварцевого волокна, а также анализом знака деталей микрорельефа. На рис. 46, б показан еще один пример почти периодического расположения ступеней заколов, которые могли бы фрактографически декорировать межкристаллитную границу. Однако на данном снимке межкристаллитная граница отсутствует, и это отсут

ствие можно определить морфологически: в месте выхода границ ориентировка поверхности скола никогда не изменяется, а на рис. 46, б у начала ступеней заколов можно наблюдать резкое изменение этой ориентировки.

Е. П. Ермаков наблюдал газовой-жидкие включения со сложным «сосульковидным» рельефом стенок вакуоли и связывает их образование с быстрым выделением родственного вещества в результате внезапного спада давления и температуры.

Подобный сосульковидный рельеф получен при травлении в 40 %-ном водном растворе HF в течение 10—30 мин некоторых образцов природного кварца (рис. 47); эту работу мы проводили для определения разориентировки границ зерен по ямкам травления. Непонятные вначале результаты впоследствии нашли объяснение в экспериментах по травлению льдистого кварца, в котором кроме дислокаций и межкристаллитных границ (вдоль этих дефектов и происходит преимущественное растворение) других дефектов (выявляемых на уровне ЭМ) не существует. Как оказалось, подобный рельеф образуется при травлении межкристаллитных границ, ориентация которых не совпадает с плоскостями (1010) и (1120). Сосульки ориентированы вдоль оси C [0001] и образуются вследствие воздействия на кварц двух факторов. Во-первых, отчетливо можно видеть, что каждая сосулька на вершине несет нащепку какого-то вещества, которая экранирует кварц от травителя вдоль оси C . Во-вторых, проявляется эффект анизотропии скоростей травления кварца вдоль оси C и вдоль направлений, перпендикулярных к нему. В результате этого неэкранированные поверхности кварца вдоль оси C растворяются значительно быстрее. Таким образом, с помощью травления мы воспроизвели результат, обратный методу VLS (пар — жидкость — твердое тело), по которому, например, выращиваются кремниевые щетки. Как следует из наших экспериментов, образование сосулес в вакуолях ГЖВ в природном кварце должно происходить в результате повышения давления и температуры, а не спада, и их наличие следует рассматривать как один из признаков метаморфических преобразований кварца.

В связи с экспериментами по травлению поликристаллического кварца необходимо отметить следующее. Как было показано, грануляция кварца может происходить при неоднократном переходе породы через точку $\alpha \rightleftharpoons \beta$ инверсии при давлении 240—900 МПа. С другой стороны, известно, что кварц при повышенных давлениях (300 МПа) и температурах (500 °C) в гидростатических условиях подвергается пластической деформации и в нем образуются дислокации [3]. При продолжительном отжиге (12 ч при 425 °C) плотность дислокаций уменьшается в результате того, что дислокации с противоположными векторами Бюргерса взаимно аннигилируют, а дислокации одного знака выстраиваются на границах субзерен. При температурах 700—900 °C происходит рекристаллизация кварца с образова-

Несмотря на то, что на крупных идиоморфных кристаллах природного и синтетического кварца наблюдаются видоименные грани, ступени и аксессуары роста, в литературе отсутствуют какие-либо сведения о визуализации процессов роста на уровне электронной микроскопии.

Отсутствие литературных данных о фигурах роста на уровне ЭМ можно объяснить тем, что кристаллы кварца, синтетические и природные, почти всегда покрыты пленками оксидов и загрязнений, которые невозможно удалить без изменения морфологии микрорельефа поверхностей граней. Синтетические кристаллы кварца обычно выращиваются в растворах, содержащих кремнезем и минерализаторы Na_2CO_3 , NaHCO_3 , K_2CO_3 , NaOH , NH_4F при температурах 330—420 °C [12]. Коэффициент заполнения автоклавов варьирует в пределах 0,76—0,78.

В экспериментах по выращиванию кварца с применением слабоконцентрированного раствора с низким коэффициентом заполнения автоклавов ($\sim 0,3$) были получены кристаллы, на которых под электронным микроскопом обнаружены ранее не наблюдаемые на кварце различные микротопографии поверхностей роста, такие, как грубая скульптура роста (рис. 51). По данным оптической и сканирующей микроскопии, было установлено, что общая картина роста определяется кристаллизацией одной грани $(10\bar{1}0)$, хотя отдельные участки поверхности ориентированы по-разному.

На рис. 52, 53 изображены ступени разной высоты (1 нм — 1 мкм) и эшелоны ступеней, плавно изогнутые и прямолинейные, причем у последних высота не превышает 10 нм. Плоские участки поверхностей соответствуют граням простых форм кварца: $\{10\bar{1}0\}$, $\{10\bar{1}1\}$ и $\{01\bar{1}1\}$, а направление ступеней совпадает с направлениями ребер между этими гранями. Если кварц содержит бразильские двойники, границы которых ориентированы по граням положительного ромбоэдра $\{10\bar{1}1\}$, то на поверхностях кварца их легко обнаружить, так как выходы границ двойников пересекают ступени (см. рис. 53, а).

Поскольку на электронно-микроскопических снимках синтетических кристаллов кварца установлено, что ступени являются ростовыми, был сделан вывод о том, что подобные ступени на поверхностях раздела зерен природного кварца также характеризуют процессы роста, а условия роста соответствуют экспериментальным.

Ступени роста генерируются на дислокационных ямках и элементах микрорельефа с отрицательным знаком (рис. 54). Поскольку при выращивании синтетических кристаллов кварца процессы травления отсутствовали, можно полагать, что ямки образовались вследствие различия нормальной и тангенциальной скоростей роста. Общую ориентировку поверхности роста на рис. 54 мы определяем как грань $(10\bar{1}1)$. При объединении эшелонов ступеней образуются грани $(10\bar{1}0)$, $(10\bar{1}1)$, $(01\bar{1}0)$. На

рис. 54, б удаляемая часть скола в виде козырька осталась на растущей поверхности кварца (указана стрелкой). Можно видеть, что на границе раздела двух зерен в некоторых местах существует промежуток высотой 10—15 нм, а в других местах зерна находятся в состоянии плотного контакта.

На рис. 55, а поверхность роста граничит с поверхностью излома по межкристаллитной границе (обозначена буквой А). На рис. 55, б граница двух кварцевых зерен (указана стрелками) расположена перпендикулярно поверхности роста грани. Микро рельеф общей поверхности кварцевого зерна, расположенного сверху, соответствует грани (0111), а второго зерна — (1011), однако для второго зерна трудно установить, какой процесс является преимущественным: рост или растворение.

Необходимо заметить, что картины роста на природном кварце в микронном масштабе, подобные представленным на рис. 51—55, встречаются очень и очень редко. Это связано не с отсутствием перекристаллизации кварца в природе, а по-видимому, с тем, что условия сохранения скульптур роста кварца являются исключительными. Это иллюстрирует рис. 56. На участке поверхности излома размером 11×8 мкм можно одновременно наблюдать ямки травления, фигуры роста, приуроченные к этим ямкам, и поверхность излома по палеомикротрещине (обозначена буквой А). Кажется противоречивым, что на столь малом участке находятся физически различные области в кварце. Однако противоречия здесь нет, так как и те, и другие области образовались в почти одинаковых условиях (почти чистая вода, интервал температуры 150—200 °C).

Реликтовые микротрещины

Как правило, кварцевые породы обычно содержат большое количество трещин. Эти трещины могут быть залеченными и их идентификация на уровне оптической и электронной микроскопии не представляет затруднений, так как в месте их прошлого расположения отмечается большое скопление ГЖВ и пор. Незалеченные трещины в оптическом микроскопе определяются весьма просто, однако под электронным микроскопом идентификация поверхностей раздела вдоль этих трещин требует тщательного анализа, поиска морфологических признаков реликтового скола. Такими признаками могут быть кварцевые волокна на поверхности скола (рис. 57, а), имеющие следы естественного травления или обособляющиеся (также в процессе природного травления) области на поверхности кварца (рис. 57, б выступ А и островок Б).

Необходимо обратить внимание на то, что на рис. 57, б имеются четкие диагностические признаки ручьевого скола; в противном случае, островок Б можно было бы диагностировать как твердое включение.

На поверхности скола присутствуют частички неизвестного тонкодисперсного вещества, которое, скорее всего, является сухим остатком газовой-жидкой фазы вакуоли, находившейся поблизости и вскрытой в момент образования реликтовой трещины.

Очень интересная особенность реликтового скола представлена на рис. 58, а. Стенки реликтовой трещины постепенно разошлись, образовав полость некоторой толщины, в которую впоследствии проникал высококонцентрированный раствор в виде рапы. Флюид не взаимодействовал с поверхностью скола и полость трещины полностью не заполнил. Благодаря этому на одной и той же поверхности скола мы можем наблюдать микро-рельеф одной стенки трещины (обозначена буквой А) и слепок (отпечаток, реплика) противоположной стенки трещины (обозначена буквой Б). По оттенению реплики толщину флюида, а, следовательно, и толщину полости трещины можно оценить в 100—150 нм.

На поверхностях излома (см. рис. 58, б) можно наблюдать признаки природного травления. Благодаря этому травлению хорошо видны области дофинеи-ских микродвойников (обозначены буквой Д). Канавка, декорированная твердыми частицами, пересекает изображение справа налево (есть еще несколько канавок без частиц). Штриховка в области двойников и на других поверхностях излома свидетельствует о том, что вся наблюдаемая поверхность представлена только кварцем. Поэтому мы предполагаем, что на снимке запечатлен процесс деформации, вероятно, в результате α - β превращения первичного крупно-зернистого кварца, сопровождающийся образованием реликтовых трещин, двойникованием и природным травлением. Таким образом, обозначенные на рис. 58, б цифрами области 1, 2, 3, 4 — это поверхности изломов новообразованных зерен кварца, а включения, расположенные между зернами 1 и 2 и 2 и 4 — это частицы дробленого кварца, обособленные, как и на рис. 57, б, при травлении.

Под оптическим микроскопом в кварцевых породах наблюдаются тончайшие волосовидные трещины небольшой длины. В этих же образцах на уровне электронной микроскопии встречаются поверхности изломов, не описанные ранее в литературе, не похожие на поверхности свежих сколов кварца и другие поверхности раздела (рис. 59—66). Наблюдаемые поверхности имеют морфологически разнообразные, но характерные для них особенности, представляют собой поверхности изломов вдоль волосовидных трещин, поэтому для их обозначения мы предлагаем использовать термин «реликтовые микротрещины» (РМ).

Многие кварцевые препараты данной серии приготовлены из образцов гранулированного кварца метасилекситовой (силектитовой) формации, представляющей собой преимущественно кварцевые (с содержанием кварца от 60 до 96 % объема тела) азональные пегматиты метаморфогенного происхождения, образующиеся на глубинах 10—15 км в высокобарических условиях

дистен-силлиманитовых серий. Поэтому наличие в кварце силектитовой формации реликтовых микротрещин объяснимо условиями образования и геологической позицией локализации. Другая часть исследованных препаратов принадлежит к силекситовой формации Среднего Урала так называемого разлистованного кварца или гранулированному кварцу слюдоносно-пегматитовой формации среднеуральского месторождения, где массовое присутствие палеомикротрещин также вполне закономерно.

В соответствии с морфологией микрорельефа ориентировка поверхности скола на рис. 59, а близка к плоскости (0001). Микрорельеф поверхности имеет черты свежего скола и признаки произошедшего изменения. Этот снимок представляет собой не только электронную фрактограмму кварца, но и снимок события далекого геологического прошлого. Изменения микрорельефа связаны с появлением ямок неизвестного происхождения, которые не похожи на ямки травления и на ямки — половинки пор. На другом снимке (см. рис. 59, б) поверхность излома по РМ также близка к плоскости (0001). В морфологии поверхности излома произошли более глубокие изменения, которые хорошо видны при сравнении с участками свежего скола. Возможно, что наличие ямок ранее неизвестного типа связано с присутствием минеральных включений в кварце.

На рис. 60, а представлен участок поверхности излома по РМ, а на рис. 60, б и 61 — границы по РМ, выходящие под некоторым углом к поверхности сколов. На снимках хорошо видно, что реликтовые микротрещины имеют тончайшую полость высотой 5—30 нм, заполненную каким-то веществом. Частишки этого вещества часто отрываются в процессе раскалывания и остаются на поверхности скола (см. рис. 60 они указаны стрелками А). Частишки совершенно не похожи на осколки кварца, поэтому мы считаем, что пленка, локализованная на РМ, имеет не кварцевую природу. Однако на основании экспериментов по травлению образцов природного кварца в растворах HF мы имеем данные, свидетельствующие о том, что пленка на РМ состоит из чистой SiO_2 .

На рис. 59—66 представлено практически полное разнообразие поверхностей изломов по палеомикротрещинам. На порах, декорирующих РМ, наблюдается иногда огранка или фасетки, но чаще всего они имеют неправильную угловатую форму. К порам, как правило, примыкают островки свежего скола кварца, и частишки извлеченной на реплику пленки. Поверхность излома, окружающая поры и островки скола, может быть гладкой, шагреновой, волнистой или ступенчатой. Поскольку в морфологии микрорельефа поверхностей изломов слабо проявляется кристалличность, было сделано предположение, что пленка, локализованная на РМ, состоит из аморфного кремнезема.

Для проверки этого предположения были проведены эксперименты по гидротермальному травлению кварца в чистой воде. В экспериментах по травлению мы использовали данные

На поверхности скола присутствуют частички неизвестного тонкодисперсного вещества, которое, скорее всего, является сухим остатком газовой-жидкой фазы вакуоли, находившейся поблизости и вскрытой в момент образования реликтовой трещины.

Очень интересная особенность реликтового скола представлена на рис. 58, а. Стенки реликтовой трещины постепенно разошлись, образовав полость некоторой толщины, в которую впоследствии проникал высококонцентрированный раствор в виде рапы. Флюид не взаимодействовал с поверхностью скола и полость трещины полностью не заполнил. Благодаря этому на одной и той же поверхности скола мы можем наблюдать микро-рельеф одной стенки трещины (обозначена буквой А) и слепок (отпечаток, реплика) противоположной стенки трещины (обозначена буквой Б). По оттенению реплики толщину флюида, а, следовательно, и толщину полости трещины можно оценить в 100—150 нм.

На поверхностях излома (см. рис. 58, б) можно наблюдать признаки природного травления. Благодаря этому травлению хорошо видны области дофинейских микродвойников (обозначены буквой Д). Канавка, декорированная твердыми частицами, пересекает изображение справа налево (есть еще несколько канавок без частиц). Штриховка в области двойников и на других поверхностях излома свидетельствует о том, что вся наблюдаемая поверхность представлена только кварцем. Поэтому мы предполагаем, что на снимке запечатлен процесс деформации, вероятно, в результате α - β превращения первичного крупнозернистого кварца, сопровождающийся образованием реликтовых трещин, двойникованием и природным травлением. Таким образом, обозначенные на рис. 58, б цифрами области 1, 2, 3, 4 — это поверхности изломов новообразованных зерен кварца, а включения, расположенные между зернами 1 и 2 и 2 и 4 — это частицы дробленого кварца, обособленные, как и на рис. 57, б при травлении.

Под оптическим микроскопом в кварцевых породах наблюдаются тончайшие волосовидные трещины небольшой длины. В этих же образцах на уровне электронной микроскопии встречаются поверхности изломов, не описанные ранее в литературе, не похожие на поверхности свежих сколов кварца и другие поверхности раздела (рис. 59—66). Наблюдаемые поверхности имеют морфологически разнообразные, но характерные для них особенности, представляют собой поверхности изломов вдоль волосовидных трещин, поэтому для их обозначения мы предлагаем использовать термин «реликтовые микротрещины» (РМ).

Многие кварцевые препараты данной серии приготовлены из образцов гранулированного кварца метасилекситовой (силектитовой) формации, представляющей собой преимущественно кварцевые (с содержанием кварца от 60 до 96 % объема тела) азональные пегматиты метаморфогенного происхождения, образующиеся на глубинах 10—15 км в высокотемпературных условиях.

дистен-силлиманитовых серий. Поэтому наличие в кварце силектитовой формации реликтовых микротрещин объяснимо условиями образования и геологической позицией локализации. Другая часть исследованных препаратов принадлежит к силекситовой формации Среднего Урала так называемого разлистотанного кварца или гранулированному кварцу слюдоносно-пегматитовой формации среднеуральского месторождения, где массовое присутствие палеомикротрещин также вполне закономерно.

В соответствии с морфологией микрорельефа ориентировка поверхности скола на рис. 59, а близка к плоскости (0001). Микрорельеф поверхности имеет черты свежего скола и признаки произошедшего изменения. Этот снимок представляет собой не только электронную фрактограмму кварца, но и снимок события далекого геологического прошлого. Изменения микрорельефа связаны с появлением ямок неизвестного происхождения, которые не похожи на ямки травления и на ямки — половники пор. На другом снимке (см. рис. 59, б) поверхность излома по РМ также близка к плоскости (0001). В морфологии поверхности излома произошли более глубокие изменения, которые хорошо видны при сравнении с участками свежего скола. Возможно, что наличие ямок ранее неизвестного типа связано с присутствием минеральных включений в кварце.

На рис. 60, а представлен участок поверхности излома по РМ, а на рис. 60, б и 61 — границы по РМ, выходящие под некоторым углом к поверхности сколов. На снимках хорошо видно, что реликтовые микротрещины имеют тончайшую полость высотой 5—30 нм, заполненную каким-то веществом. Частишки этого вещества часто отрываются в процессе раскалывания и остаются на поверхности скола (см. рис. 60 они указаны стрелками А). Частишки совершенно не похожи на осколки кварца, поэтому мы считаем, что пленка, локализованная на РМ, имеет не кварцевую природу. Однако на основании экспериментов по травлению образцов природного кварца в растворах HF мы имеем данные, свидетельствующие о том, что пленка на РМ состоит из чистой SiO_2 .

На рис. 59—66 представлено практически полное разнообразие поверхностей изломов по палеомикротрещинам. На порах, декорирующих РМ, наблюдается иногда огранка или фасетки, но чаще всего они имеют неправильную угловатую форму. К порам, как правило, примыкают островки свежего скола кварца и частички извлеченной на реплику пленки. Поверхность излома, окружающая поры и островки скола, может быть гладкой, шагреновой, волнистой или ступенчатой. Поскольку в морфологии микрорельефа поверхностей изломов слабо проявляется кристалличность, было сделано предположение, что пленка, локализованная на РМ, состоит из аморфного кремнезема.

Для проверки этого предположения были проведены эксперименты по гидротермальному травлению кварца в чистой воде. В экспериментах по травлению мы использовали данные

Г. К. Кеннеди по растворимости кварца в чистой воде в интервале температур 160—540 °С и давлении 15—75 МПа. Зависимость растворимости кварца от температуры представлена на графике (см. рис. 66). Согласно приведенному графику, растворение кварца в воде при температуре ниже 165 °С не происходит. Действительно, на поверхности скола образцов чистого бесцветного синтетического кварца, выдержанных при температуре 150 °С, признаки травления отсутствуют, а вся поверхность, как правило, покрыта частичками гелеподобного вещества (см. рис. 66, врезка). Температура 155 °С является критической, ниже ее, независимо от давления, происходит гидратация поверхностного слоя кварца, который превращается в гель. С увеличением температуры и давления этот слой растворяется, обнажая монокристалльную область, после чего начинается травление кварца в местах дефектов, находящихся на поверхности скола.

Опубликованные данные Н. П. Ермакова, Е. П. Мельникова, В. Г. Кузьмина, А. Н. Савичева подтверждают, что в кварцевых породах газовой-жидкие включения могут содержать аморфный гель и коллоидный раствор, а на изломах по палеотрещинам или границам зерен наблюдаются скопления опаловидного вещества.

Таким образом, можно предположить следующий механизм возникновения палеомикротрещин. Они образовались во время синкинематического формирования кварца силектитов, метасилекситов и слюдоносных пегматитов в термодинамических условиях, близких к амфиболитовой фации. Несмотря на их массовое развитие, условия интенсивного сжатия не способствовали их раскрытию и заполнению высокотемпературными гидротермальными растворами. И только при последующем выведении кварцевых тел по зонам глубинных разломов близко к земной поверхности, что приводило к частичному раскрытию микротрещин, они заполнялись уже низкотемпературными слабоконцентрированными растворами, которые могли приводить только к частичной регенерации стенок трещины и заполнению ее аморфным кремнеземом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенными систематическими электронно-микроскопическими исследованиями природного кварца различных формаций и искусственных монокристаллов кварца установлено, что статистически наибольшее количество газово-жидких включений фиксируется в образцах редкометалльно-пегматитовой, хрусталеносно-пегматитовой, слюдоносно-пегматитовой, силекситовой, зеленосланцевой (диафторез-зеленосланцевой) кварцево-жильной метаморфогенных и магматогенных кварцево-рудных и нематалоносных формаций. Эти наблюдения находятся в полном соответствии с известными общегеологическими данными и ранее обобщенными материалами [2]. С этими же формациями связано и наибольшее количество минералов-«узников» в вакуолях ГЖВ. Особенно это относится к кварцу пегматитовых и силекситовой формаций. В результате природного травления такого кварца на стенках ГЖВ обнаруживается наибольшее количество ямок, отражающих присутствие в нем повышенного количества дислокаций.

В изученных формациях достоверно выявлены на электронно-микроскопических фрактограммах кварца твердые включения, представленные стекловатыми, стекловатыми раскристаллизованными и минеральными включениями. Эти включения впервые установлены в кварце силекситовой, силектитовой (т. е. метасилекситовой) и дистен (эклогит)-сланцевой кварцево-жильной формаций, что свидетельствует о высокотемпературности и близости условий их образования. Особая ценность прецизионного обнаружения редко встречающихся стекловатых и частично раскристаллизованных стекловатых включений в кварце упомянутых формаций заключается в следующем. В течение уже длительного времени ведется дискуссия о правомерности отнесения безрудного кварца ряда месторождений Урала и других регионов к силекситовой и метасилекситовой (силектитовой, по нашей терминологии) формациям, по своему образованию близко находящимся к термодинамическим условиям возникновения пегматитов соответственно магматогенной и метаморфогенной групп.

Инструментально установленные и фотографически зафиксированные стекловатые включения в гранулированном и разлитом кварце среднеуральских месторождений положительно и однозначно решают вопрос о прохождении ими стадии расплава и подтверждают ранее высказанную Е. П. Мельниковым, В. Д. Оболкиным, А. А. Евстроповым точку зрения о генетическом родстве кварца силектитовой и силекситовой формаций с пегматитами.

По электронно-микроскопическим фрактограммам силекситового кварца выявляется также и известная зональность силекси-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балакирев В. Г., Цинобер Л. И., Поверина С. Н. Ямки травления на сколах кварца//Изв. АН СССР. Серия геол. — 1983. — № 10. — С. 94—103.
2. Геология, генезис и промышленные типы месторождений кварца/Сост. Е. П. Мельников. — М.: Недра, 1988.
3. Кристи Дж. М., Эрделл А. Дж. Деформационные структуры в минералах//Электронная микроскопия в минералогии. — М., 1979. — С. 363—391.
4. Леммлейн Г. Г., Князев В. С. Опыт изучения обломочного кварца//Изв. АН СССР, Сер. геол. — 1951. — № 4. — С. 99—101.
5. Мельников Е. П. Классификация кварцевых метаморфитов//Записки ВМО. — Вып. 2. — 1988. — С. 429—436.
6. Методы электронной микроскопии минералов/Г. С. Грицаенко, Б. Б. Звягин, Р. В. Боярская и др. — М.: Наука, 1969.
7. Осинский А. В., Соколов Я. Н., Лебедев В. В. Формационно-генетические типы безрудной кварцево-жильной минерализации и основные принципы ее мелкомасштабного прогнозирования//Принципы прогноза эндогенных неметаллических полезных ископаемых. Нов. сер. — Л., 1981. — Т. 292. — С. 18—37.
8. Рёддер Э. Флюидные включения в минералах. — Т. II. Использование включений при изучении генезиса пород и руд. М.: Мир, 1987.
9. Рёддер Э. Флюидные включения в минералах. — Т. I. Природа включений и методы исследований. М.: Мир, 1987.
10. Самойлович М. И., Хаджи В. Е., Цинобер Л. И., Гордиенко Л. А. Реальная структура синтетического кварца (дислокации, двойники, включения)//Синтез минералов. — М., 1987. — С. 81—130.
11. Сонюшкин В. Е. Электронная микроскопия включений минералообразующей среды в кварце//Изв. АН СССР. Сер. геол. — 1981. — № 1. — С. 85—95.
12. Хаджи В. Е., Цинобер Л. И., Штеренлихт Л. М. Синтез минералов. — Т. 1. — М.: Недра, 1987.
13. Цинобер Л. И., Балакирев В. Г. Структурно-геометрический анализ модели границы бразильского двойника кварца//Кристаллография. — 1981. — Т. 259. — № 4. — С. 846—850.
14. Цинобер Л. И. Некоторые особенности морфологии кристаллов искусственного кварца//Тр. ВНИИМ. — № 1. — 1956. — С. 105—116.
15. Basset G. A new technique for decoration of cleavage and slip steps on crystal surfaces//Phil. Mag. — 1958. T. 3. — N. 33. — P. 1042—1045.

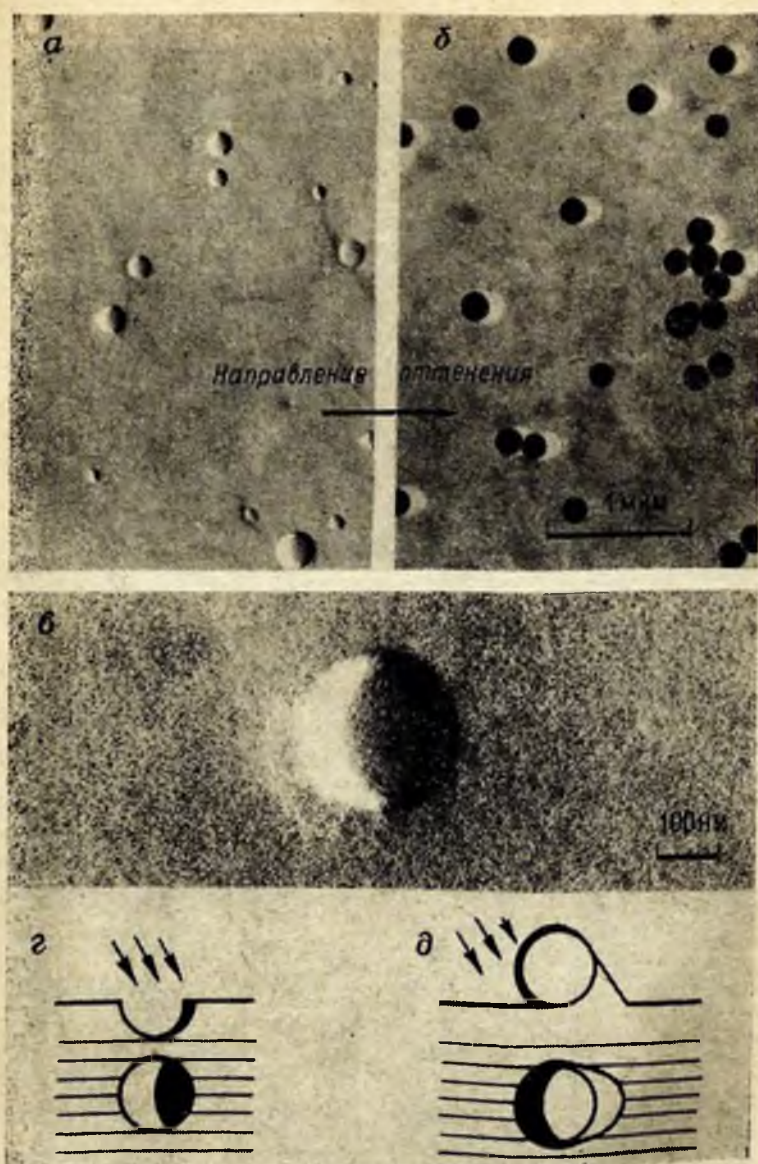


Рис. 1. Платиноугольная реплика на отрицательных и положительных деталях микрорельефа:

а — сферические ямки от пор; *б* — сферические частицы кремнезема на угольной подложке, на одну сторону подложки нанесена платиноугольная реплика (тень белая); *в* — определение направления оттенения по зерну реплики; *г* и *д* — схемы, поясняющие образование тени на снимках *а* и *б* соответственно

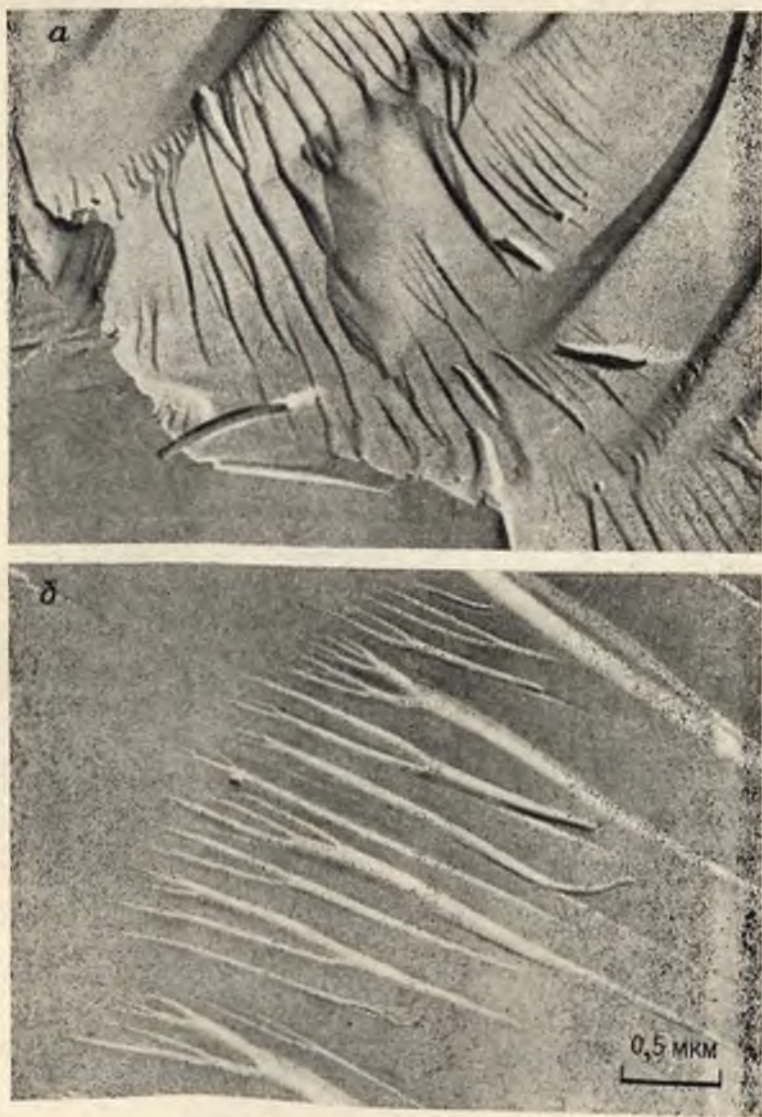


Рис. 2. Наиболее типичные сколы кварца:
а — раковистый; *б* — ручьевого

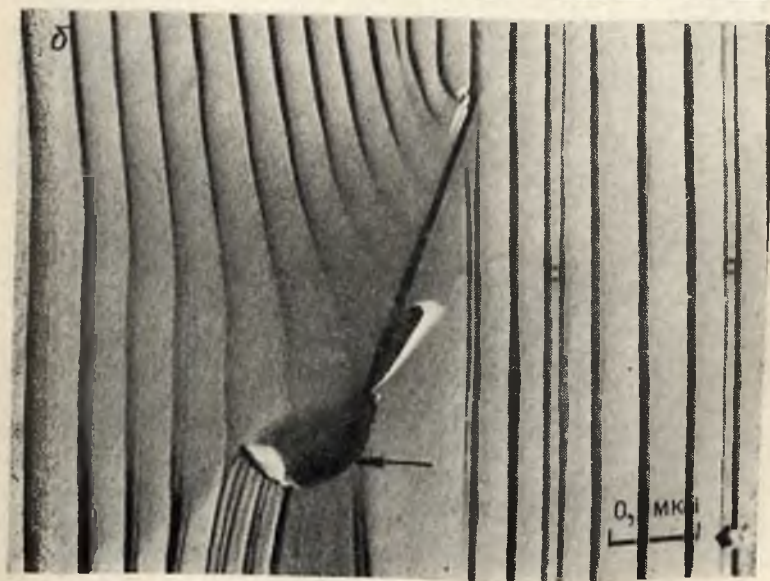


Рис. 3. Сколы кварца:

а — пинакоидальный (0001) скол; *б* — полосчатый скол, на котором присутствует твердое включение. Стрелкой показано направление распространения трещины, кружочками — интерферирующие прямые и отраженные волны

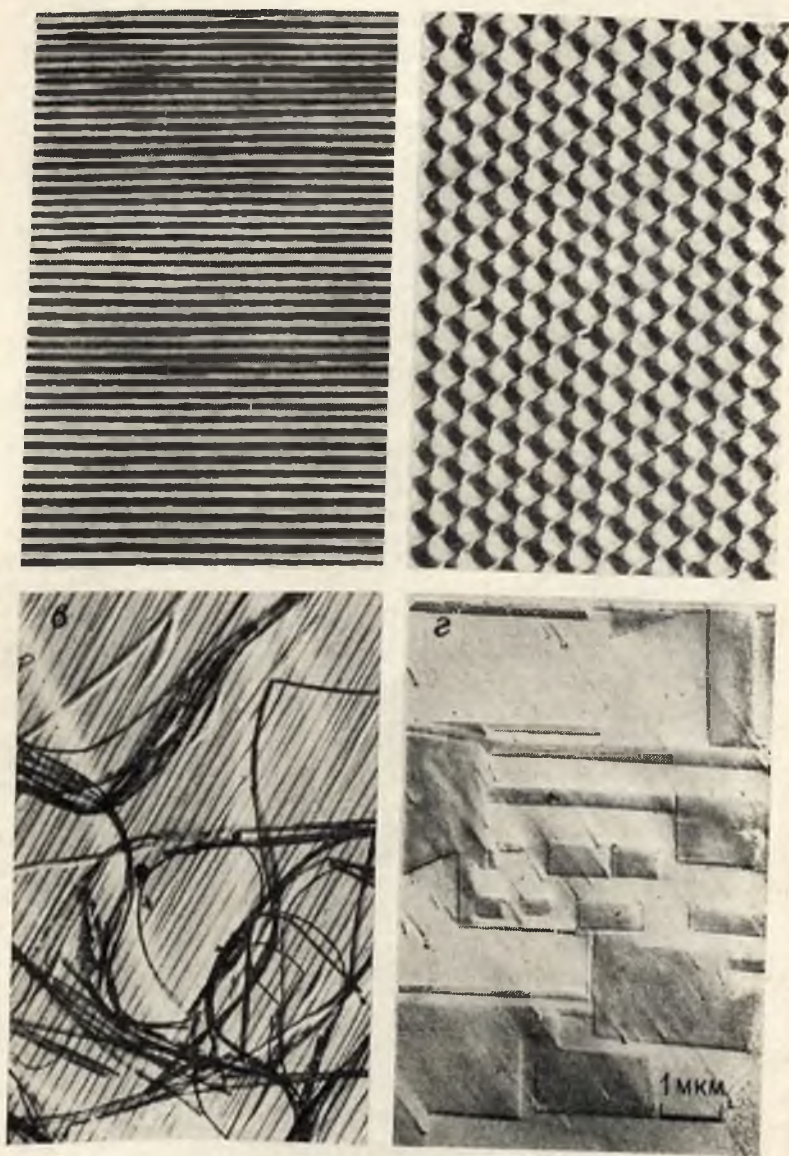


Рис. 4. Сколы монокристалльного кварца:
а — полосчатый; *б* — сетчатый на сколе $(10\bar{1}0)$; *в* — волокнистый; *г* — полигенетический, бразильские двойники на сколе $(10\bar{1}\bar{1})$

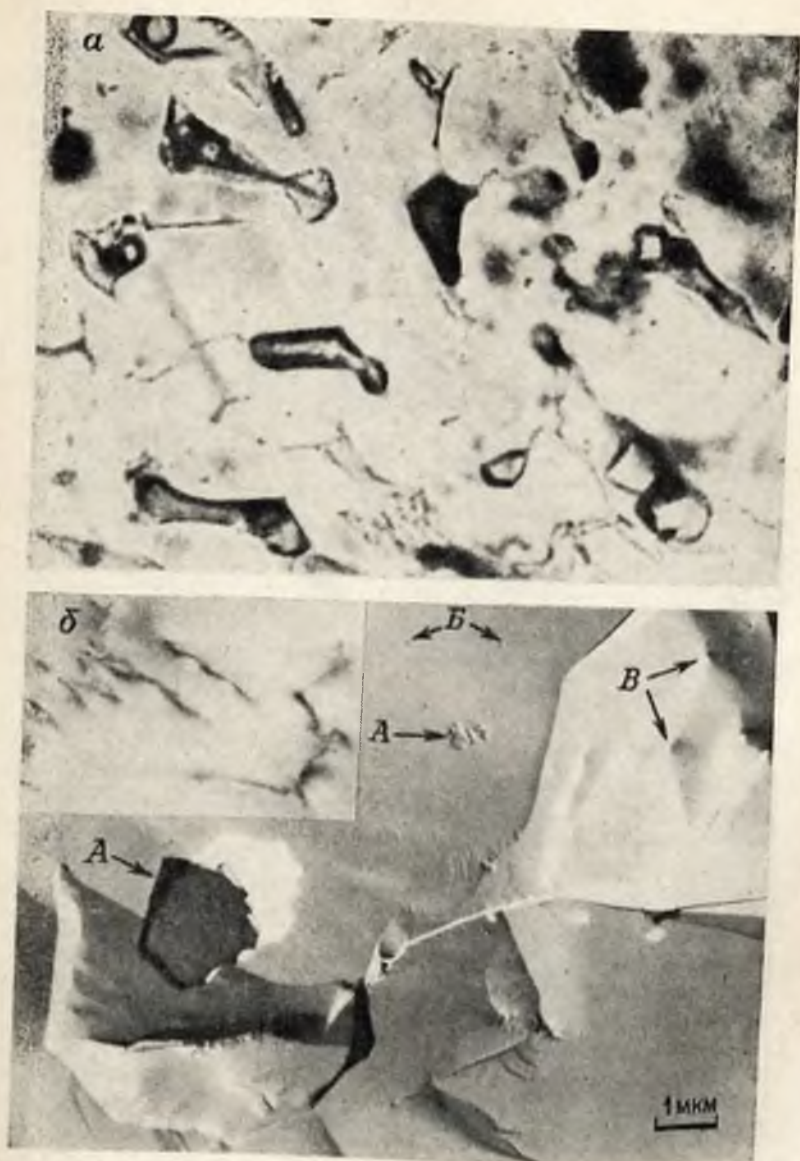


Рис. 5. Газово-жидкие включения:

a — оптический снимок (Ув. X240); *б* — электронная микрофотография. *A* — осколки кварца; *B* — сухой остаток газовой-жидкой фазы; *B* — дислокационные ямки травления. На трещке — дислокация в осколке кварца. Силектитовая формация. Средний Урал. Кварц гранулированный мелкозернистый



Рис. 6. Газово-жидкие включения на субпинакоидальном сколе.

Кроме ГЖВ, на сколе присутствуют субмикроскопические включения. В вакуолях ГЖВ стрелками указаны минералы игольчатой формы. Силекситовая формация. Средний Урал. Кварц гигантозернистый непрозрачный

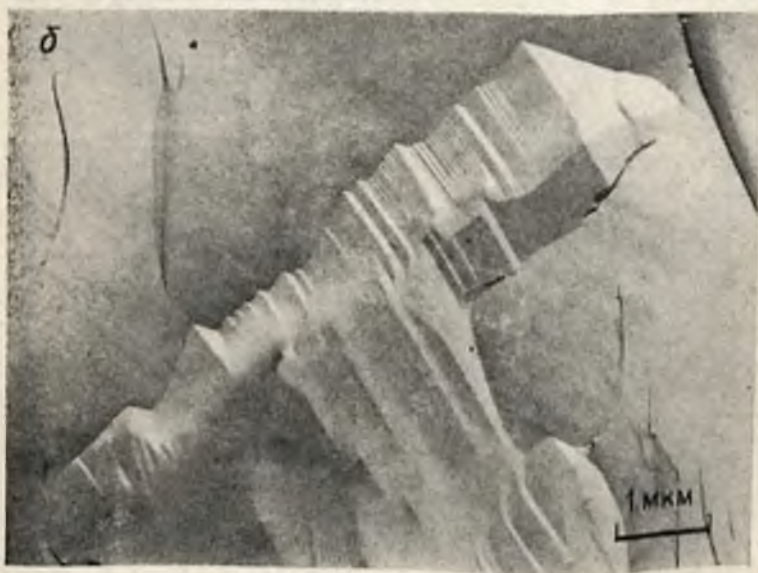
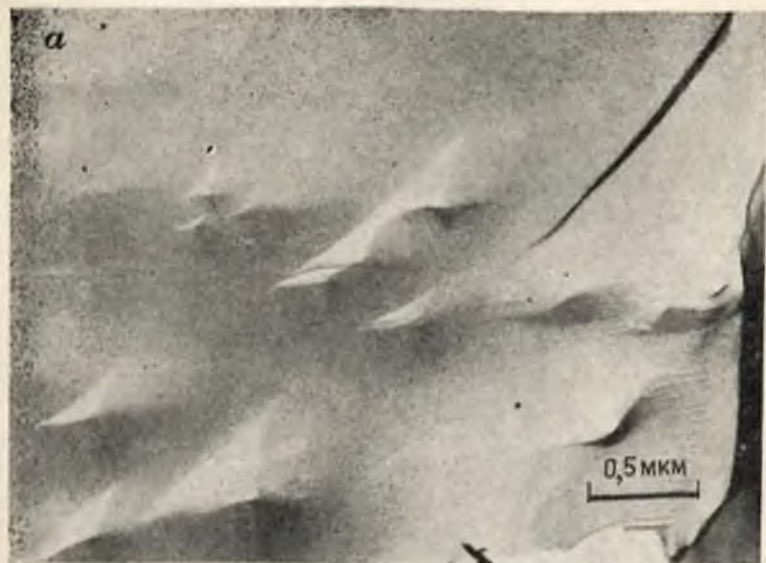


Рис. 7. Фасетирование (а) и огранение (б) стенок газово-жидкого включения.

Хрусталеносная кварцево-жильная формация Приполярный Урал. Кварц гигантозернистый полупрозрачный.

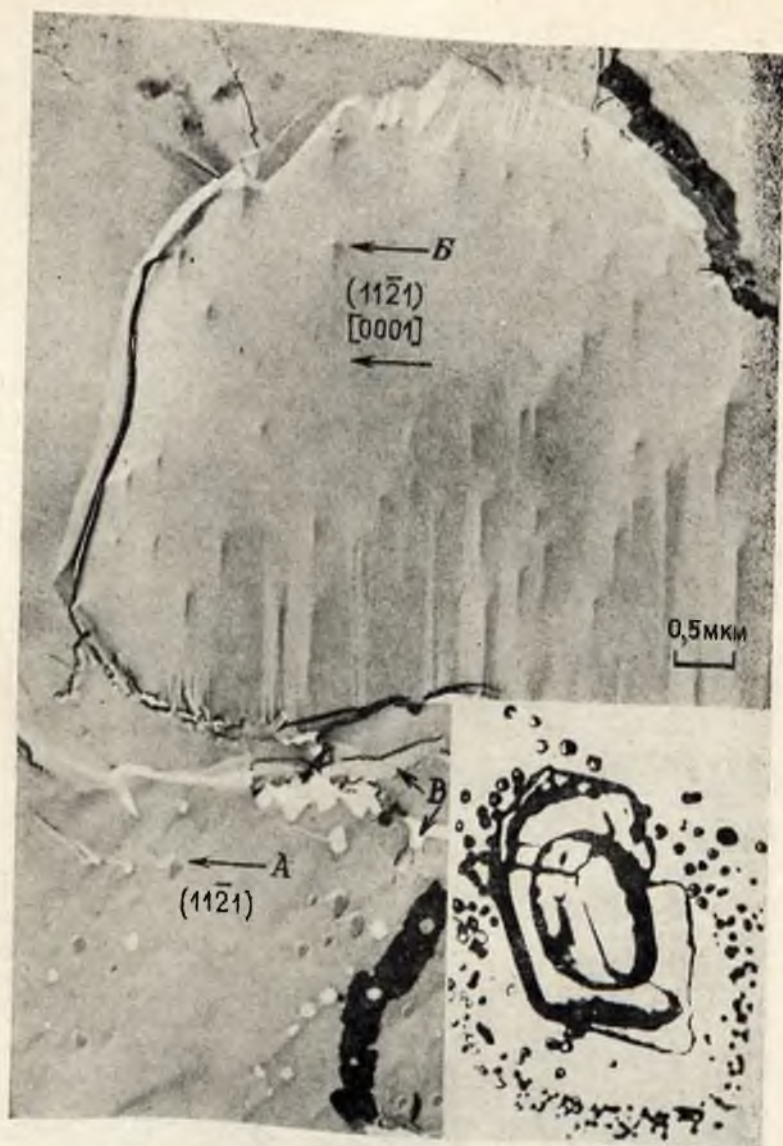


Рис. 8. Ореол субмикроскопических включений около ГЖВ. Стрелками указаны: А — поры на поверхности скола, В — ямки природного травления. В — продукты раскристаллизации бывшего раствора. На врезе справа оптический снимок (Ув. $\times 320$). Хрусталеносно-пегматитовая формация, Украина. Кварц гигантозернистый полупрозрачный



Рис. 9. Газово-жидкие включения, имеющие различный состав и концентрацию газовой-жидкой фазы.

Силекситовая формация. Средний Урал. Кварц гигантозернистый непрозрачный

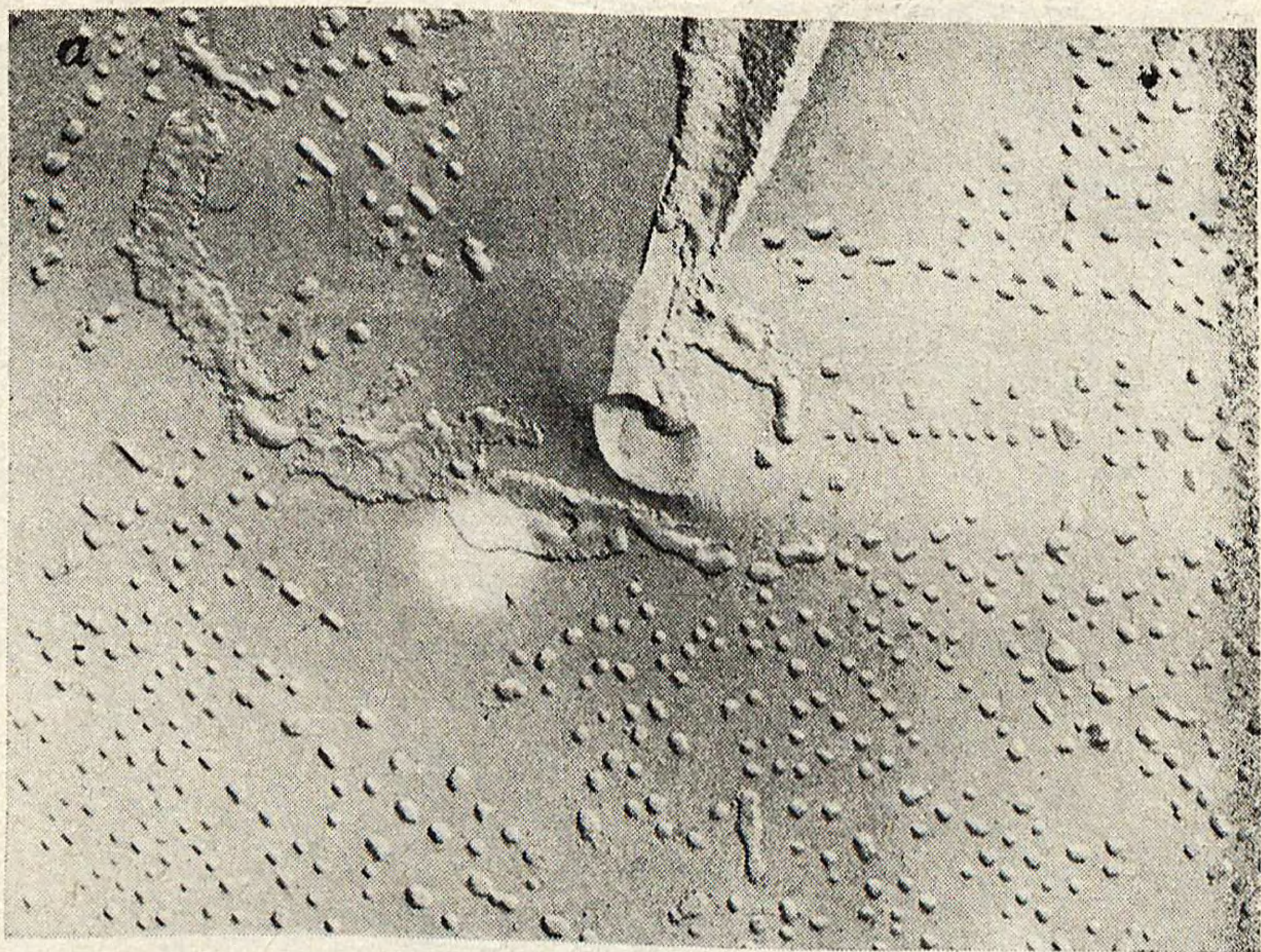


Рис. 10. Следы газовой-жидкой фазы:

a — эпитаксиальное расположение частиц; *б* — дендритообразная раскристаллизация. Дистен-сланцевая кварцево-жильная формация. Средняя Азия. Кварц гигантозернистый прозрачный и полупрозрачный

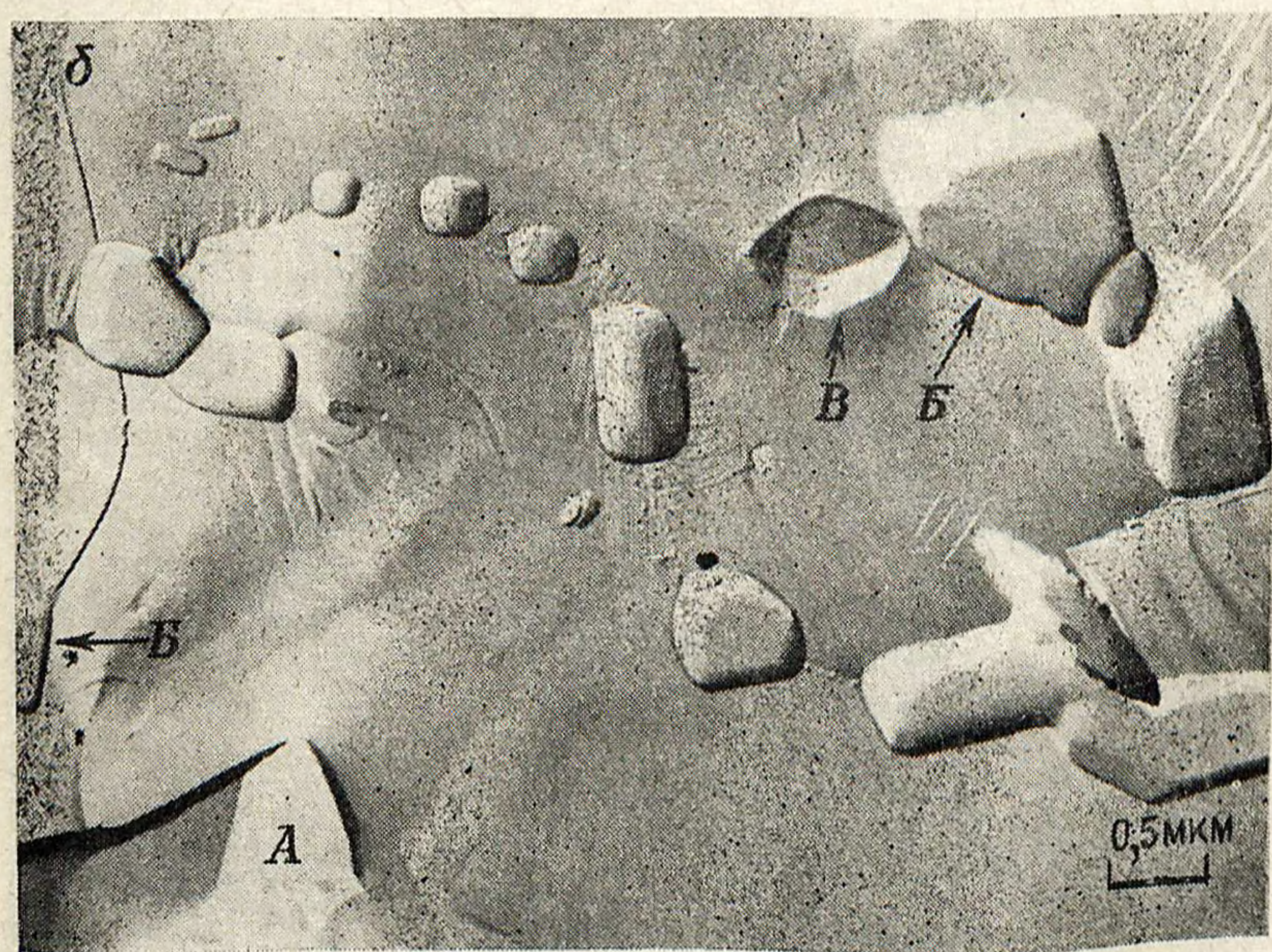
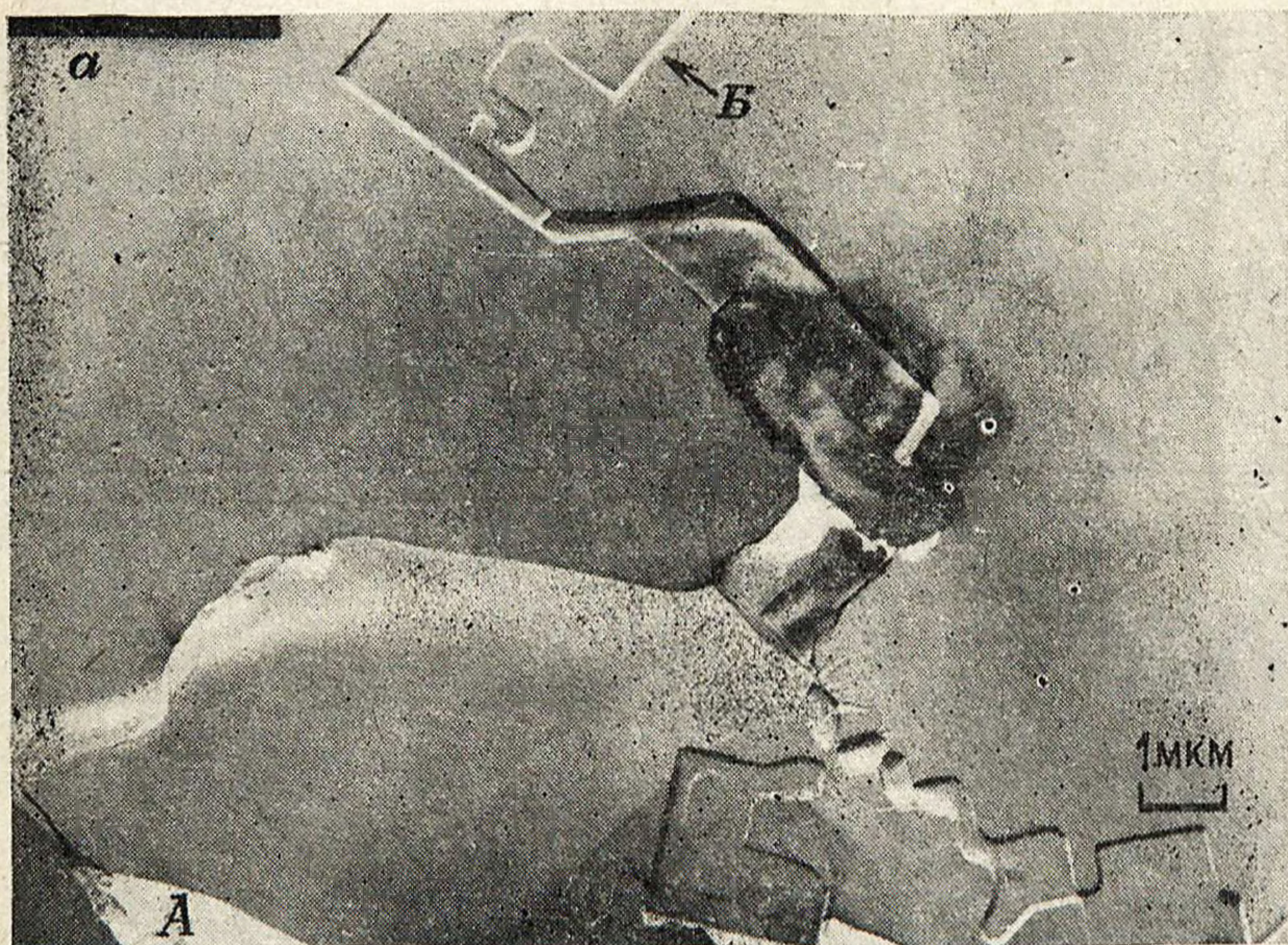


Рис. 11. Газово-жидкие включения (обозначены А и В).

Стрелками В показаны микрокристаллы, образовавшиеся из газовой-жидкой фазы. Хрусталеносно-пегматитовая формация. Украина. Кварц гигантозернистый непрозрачный

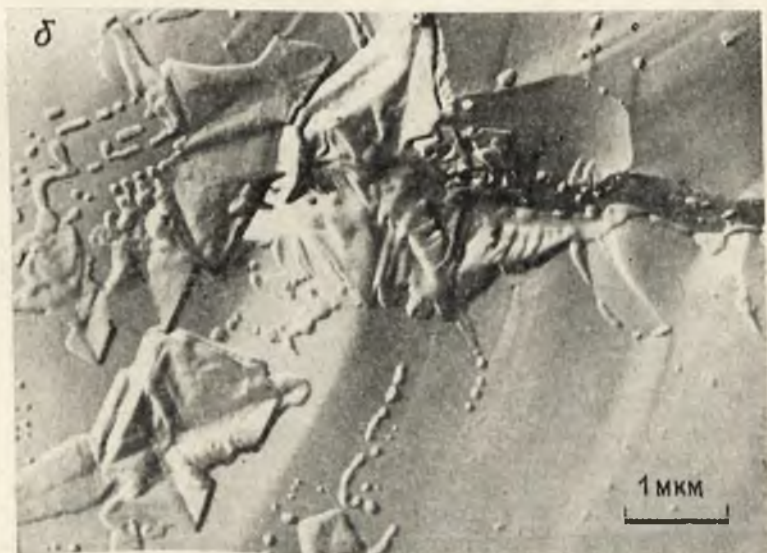


Рис. 12. Газово-жидкие включения.

Преимущественная раскристаллизация раствора вдоль ребер негативного кристалла (а) и вдоль ступеней скола отрицательного знака (б). Формация мусковитовых пегматитов. Карелия. Кварц крупнозернистый прозрачный

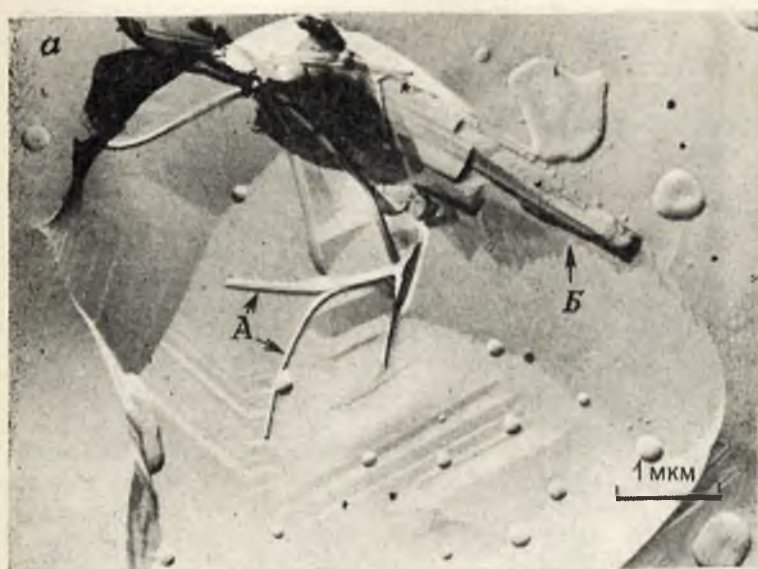


Рис. 13. Газово-жидкие включения:

а — игольчатые минералы в вакуоли: *А* — дочерние, *Б* — минералы-спутники;
б — сложная система ступеней на стенке вакуоли. Формация мусковитовых
 пегматитов. Карелия. Кварц гетерозернистый, полупрозрачный

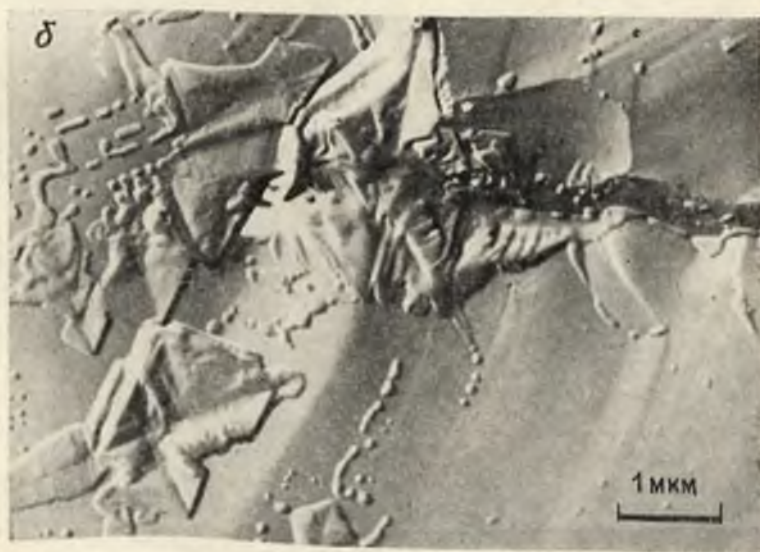
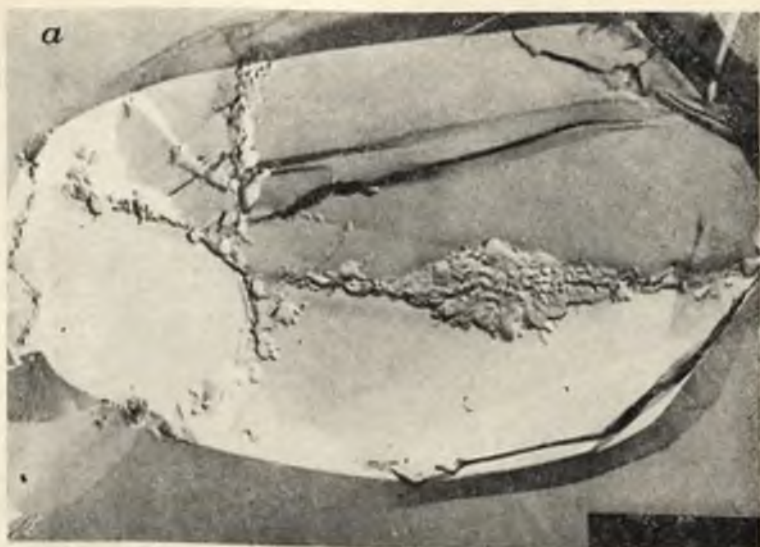


Рис. 12. Газово-жидкие включения.

Преимущественная раскристаллизация раствора вдоль ребер негативного кристалла (а) и вдоль ступеней скола отрицательного знака (б). Формация мусковитовых пегматитов. Карелия. Кварц крупнозернистый прозрачный



Рис. 13. Газово-жидкие включения:

а — игольчатые минералы в вакуоли: *А* — дочерние, *Б* — минералы-спутники.
б — сложная система ступеней на стенке вакуоли. Формация мусковитовых пегматитов. Карелия. Кварц гетерозернистый, полупрозрачный

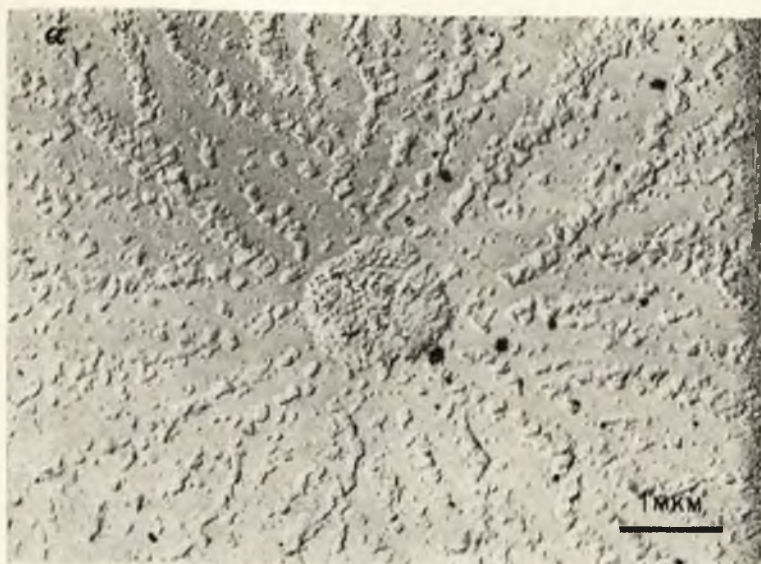


Рис. 14. Газово-жидкие включения;

а — аномально большая масса сухого остатка, вскрытие включения сколом;
б — разгерметизация ГЖВ при декрепитации ($T_{декр} = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$). Формации
 редкометалльных пегматитов. Казахстан. Кварц гигантозернистый непрозрач-
 ный

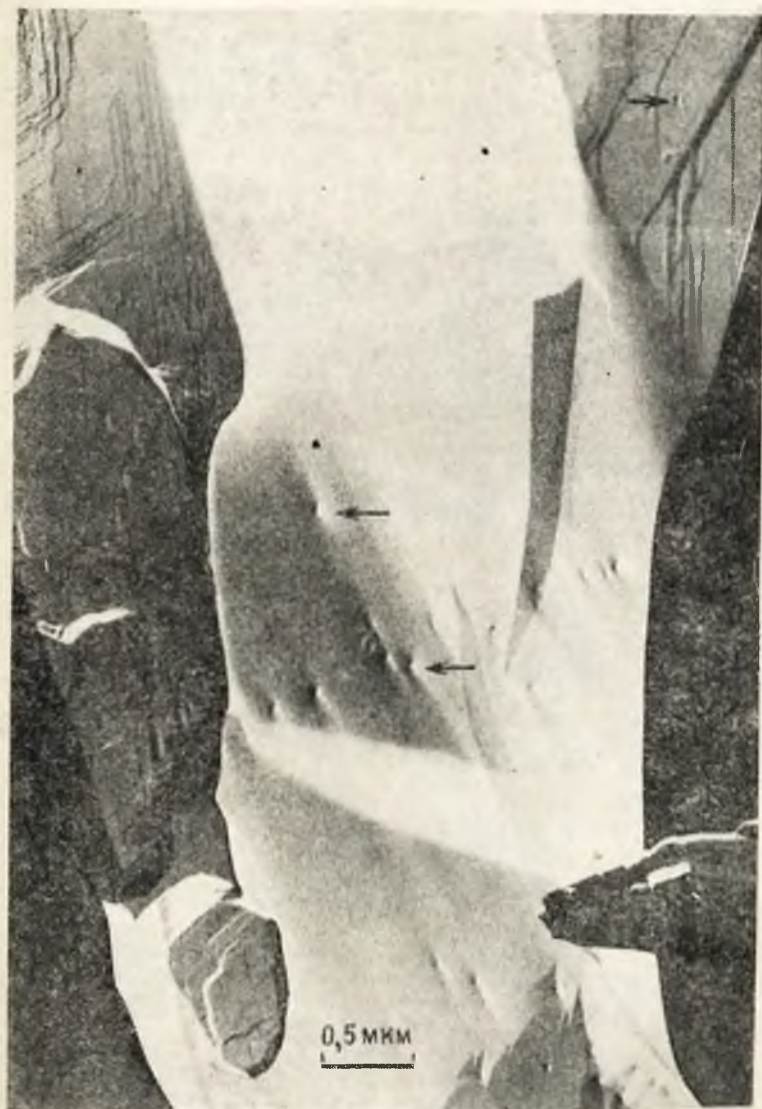


Рис. 15. Микрокристалл (слева) и отпечатки от микрокристалла (справа сверху) на поверхности углубления.

Стрелками показаны ямки на поверхности стенок вакуоли. Хрусталоносно легматитовая формация. Украина. Кварц гигантозернистый полупрозрачный

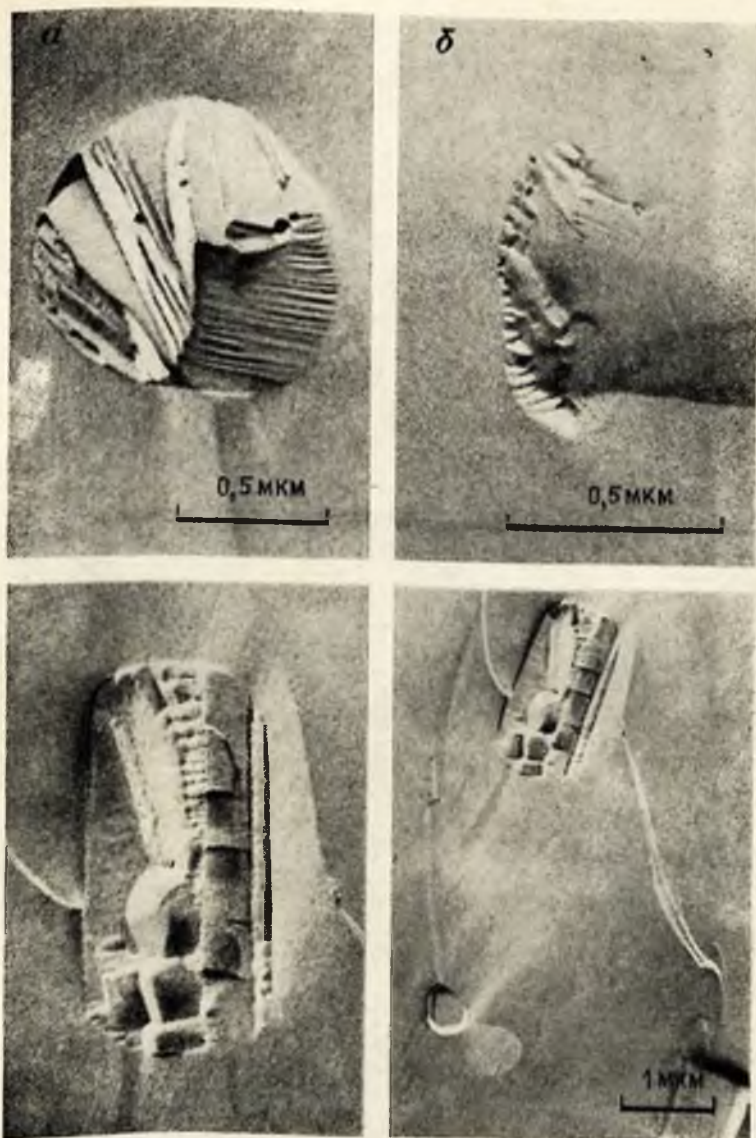


Рис. 16. Твердые включения:

а — включение стекла; *б* — стекловатое частичное раскристаллизованное включение; *в* (внизу слева) — стекловатое раскристаллизованное включение; *г* (внизу справа) — генерация заколов на включениях. Силекситовая формация, Средний Урал. Кварц гигантозернистый полупрозрачный

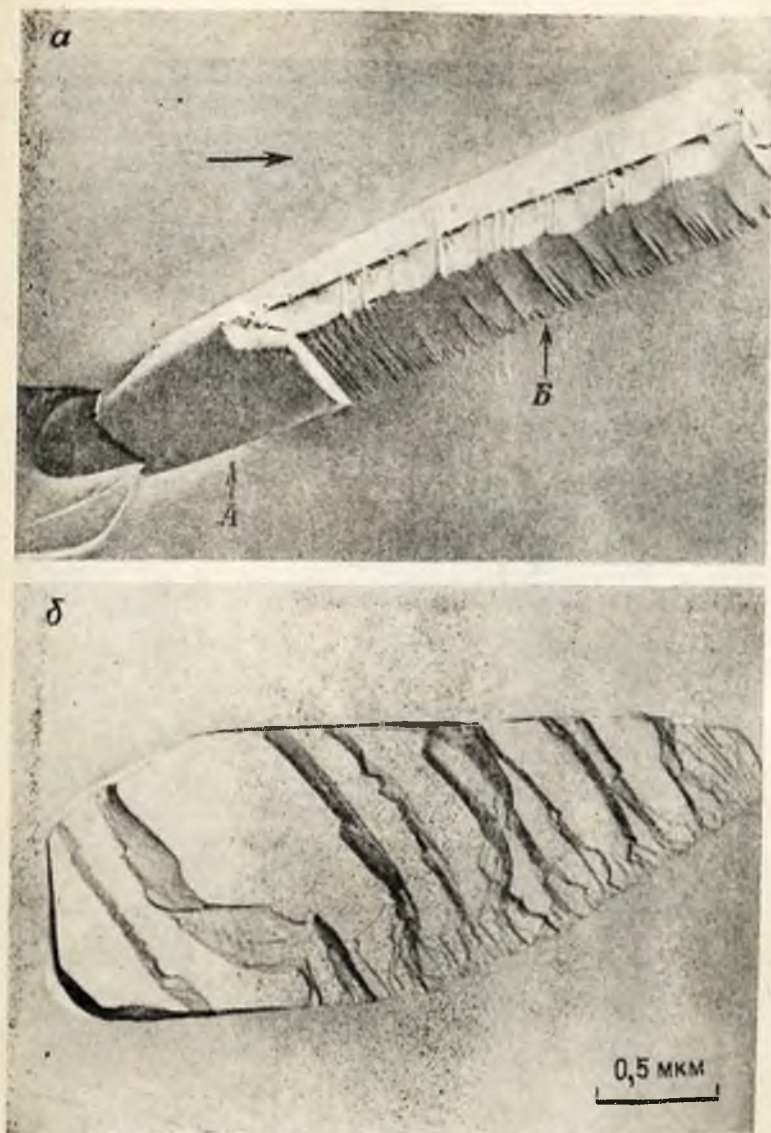


Рис. 17. Твердые включения:

а — двухфазовое включение; *б* — твердое включение, минерал-спутник; стрелками показаны: *Л* — часть включения, полностью извлеченная на поверхность скола, *Б* — частично извлеченное включение. Стрелка на поверхности скола указывает на направление оттенения. Силекситовая формация, Средний Урал. Кварц крупно-гигантозернистый непрозрачный

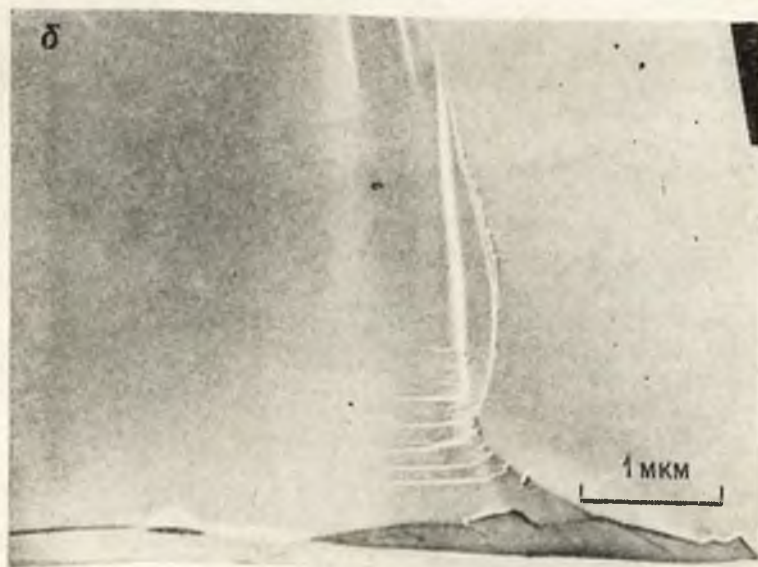


Рис. 18. Твердые слоистые включения:

а — параллельные поверхности скола, *б* — перпендикулярные. Формация мусковитовых пегматитов. Карелия. Кварц гетерозернистый прозрачный



Рис. 19. Микрористаллы акмита на пинакоидальном слое (0001) синтетического кварца.

Кварц выращен в щелочном растворе при давлении $7 \cdot 10^6$ Па и температуре 330°C

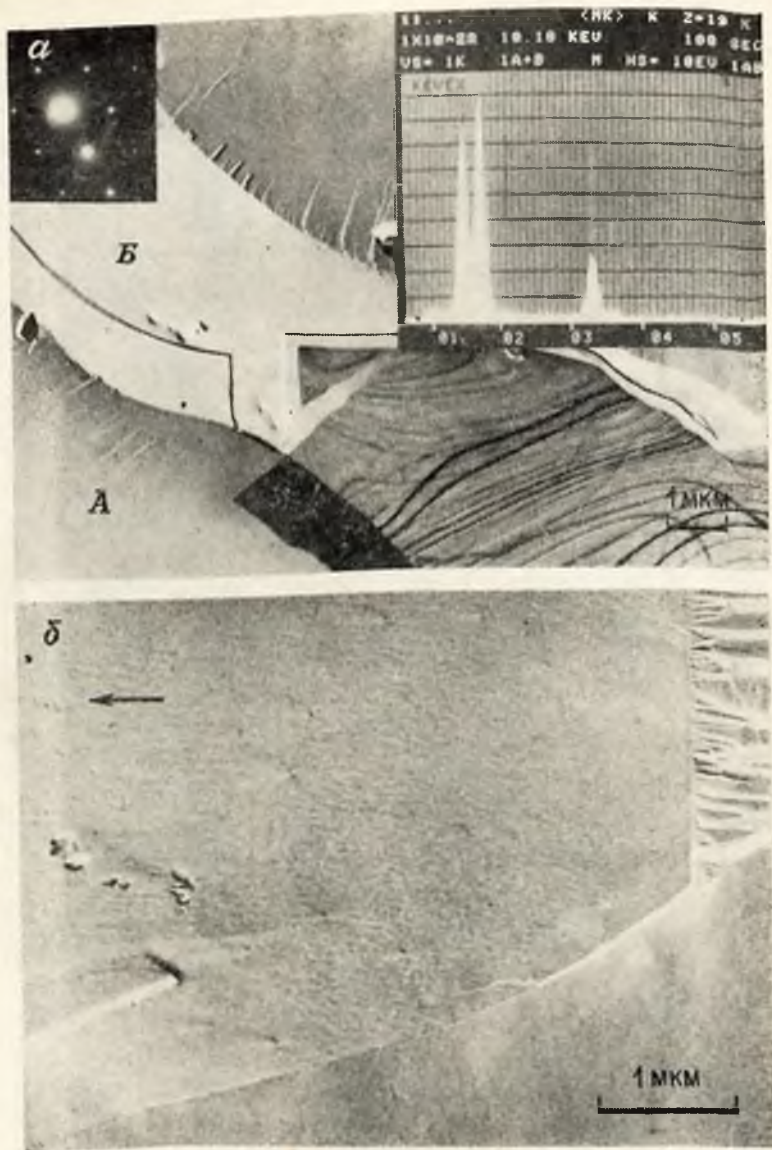


Рис. 20. Твердые включения:

а — включение слоистое, следы газовой-жидкой фазы отсутствуют; на врезке справа — распределение элементного состава включения, на врезке слева — микродифракционная картина; б — часть крупного включения. Стрелкой показаны следы газовой-жидкой фазы. Силексеновая формация. Средний Урал. Кварц гигантозернистый полупрозрачный



Рис. 21. Агрегат твердых слоистых включений, извлеченных на реплику.

Стрелками указаны частицы неизвестной природы, декорирующие кромки и ступени включения. Формация редкометалльных пегматитов. Казалстан. Кварц гигантосернистый полупрозрачный

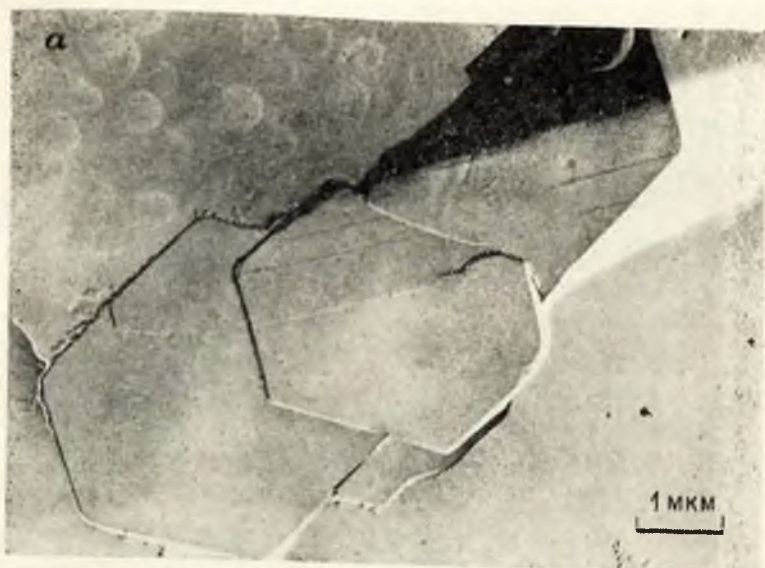


Рис. 22. Твердые включения:

а — агрегат твердых слоистых включений; *б* — включения минерала галлуазита. Формация редкометалльных пегматитов, Казахстан. Кварц крупнозернистый непрозрачный

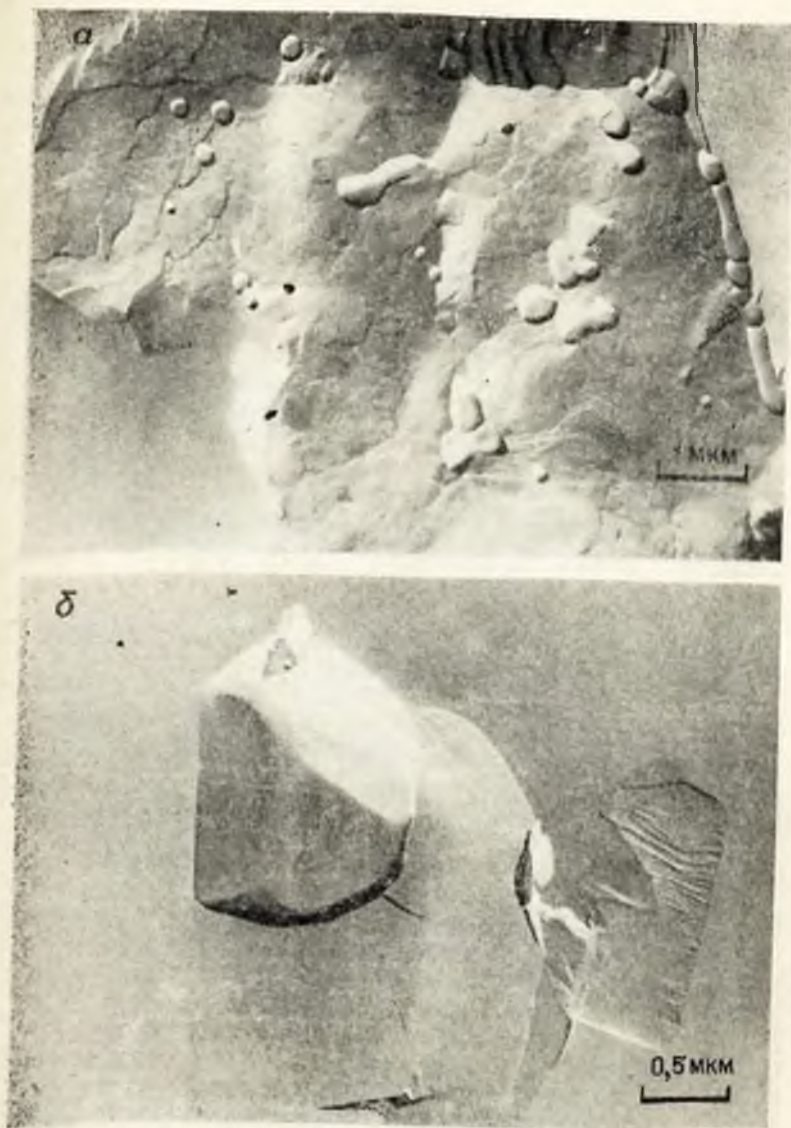


Рис. 23. Твердые включения:

a — агрегат тонких слоистых минералов, содержащих многокомпонентную газово-жидкую фазу; *б* — твердые включения, минералы-спутники. Формация мусковитовых пегматитов. Карелия. Кварц гигантозернистый непрозрачный

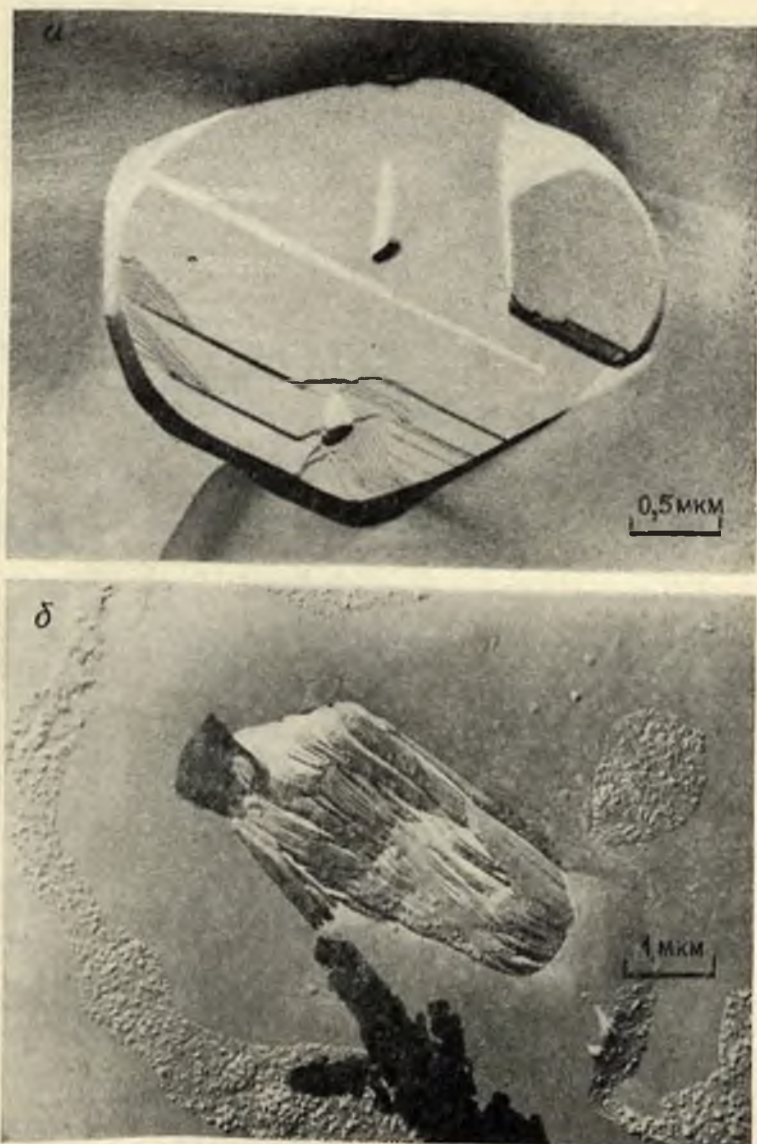


Рис. 24. Твердые включения:

a — тонкая скульптура ступеней скола на поверхности твердого включения;
б — сухой остаток газовой-жидкой фазы вокруг включения. Формация мусковитовых пегматитов. Карелия. Кварц гетерозернистый полупрозрачный

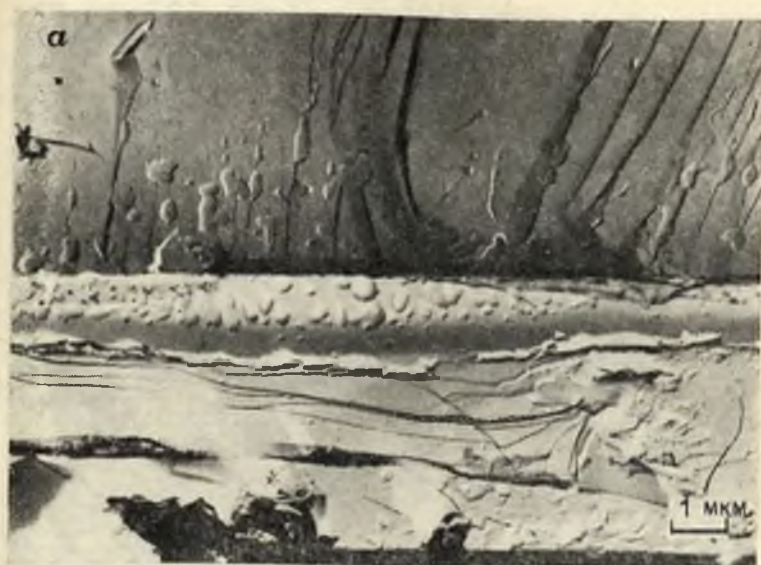


Рис. 25. Слоистые твердые включения и следы газовой-жидкой фазы вокруг них.

Силекситовая формация. Средний Урал. Кварц гигантозернистый непрозрачный

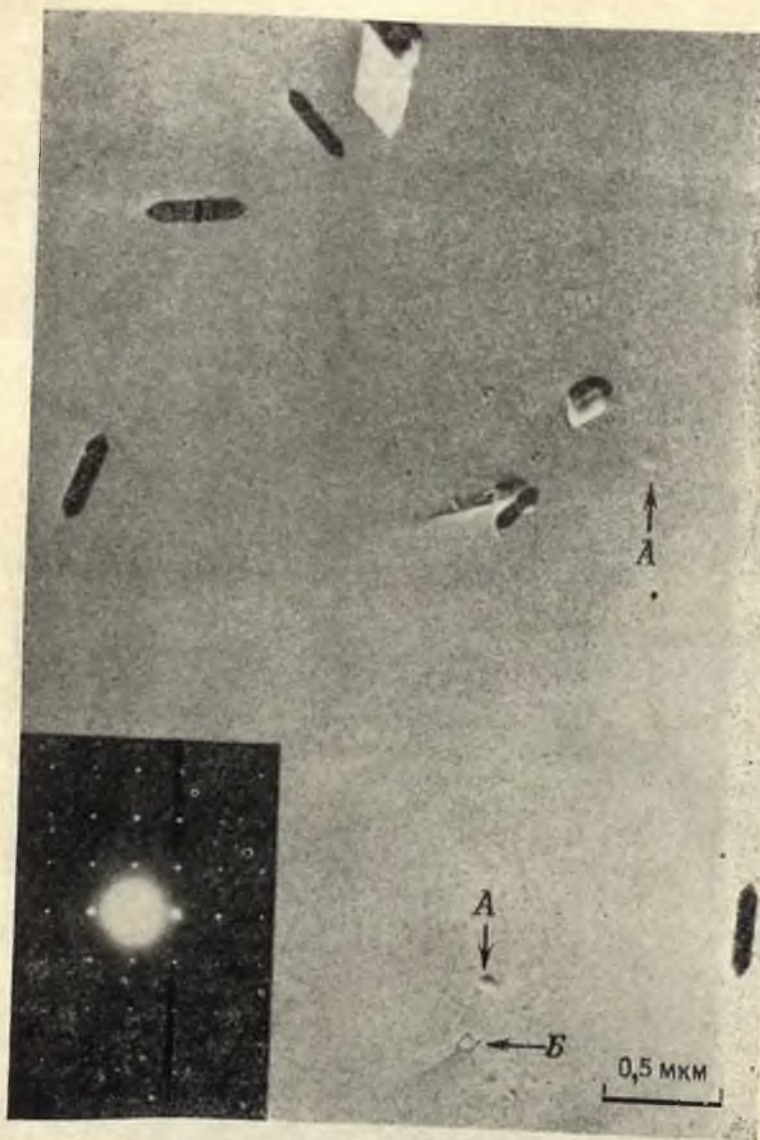


Рис. 26. Твердые включения на поверхности скола голубых вкрапленников кварца.

На врезке слева — картина точечной микродифракции рутила сечения (110).
Стрелками показаны: А — капли газовой-жидкой фазы, Б — сечение иглы рутила. Кварцево-аргиллизитовая формация. Курская магнитная аномалия. Голубой кварц



Рис. 27. Твердые включения микрокристаллов кварца на границе кварцевых зерен.

Стрелками указана чистая граница без включений. С — направление оси включений микрокристаллов кварца. Хрусталеносная формация. Приполярный Урал. Кварц крупно-гигантозернистый прозрачный



Рис. 28. Твердые включения на границе кварцевых зерен:
 а — излом по границе зерен, б — скол поперек границы. Стрелками указаны
 границы зерен на поверхности сколов. Дистен-сланцевая кварцево-жильная
 формация Южный Урал. Кварц гранулированный среднезернистый

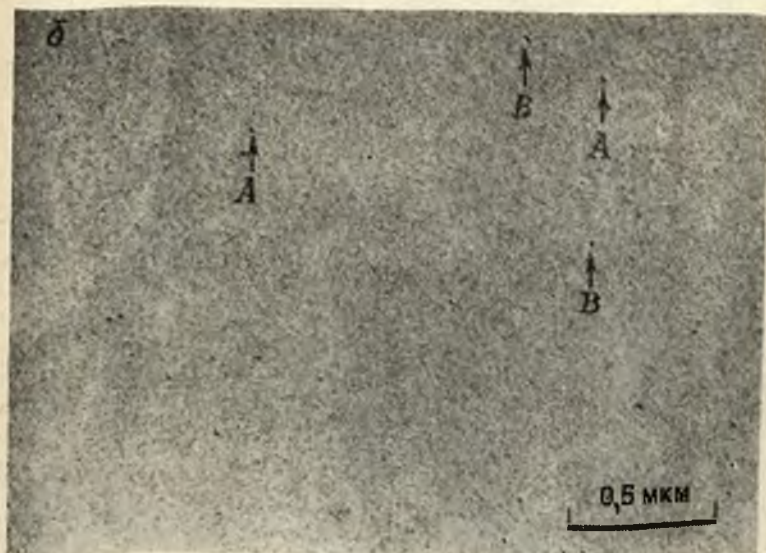


Рис. 29. Неструктурная примесь в синтетическом зеленом (а) и буром (б) кварце.

Стрелками А и Б показаны бугорки, стрелками В и Г — ямки

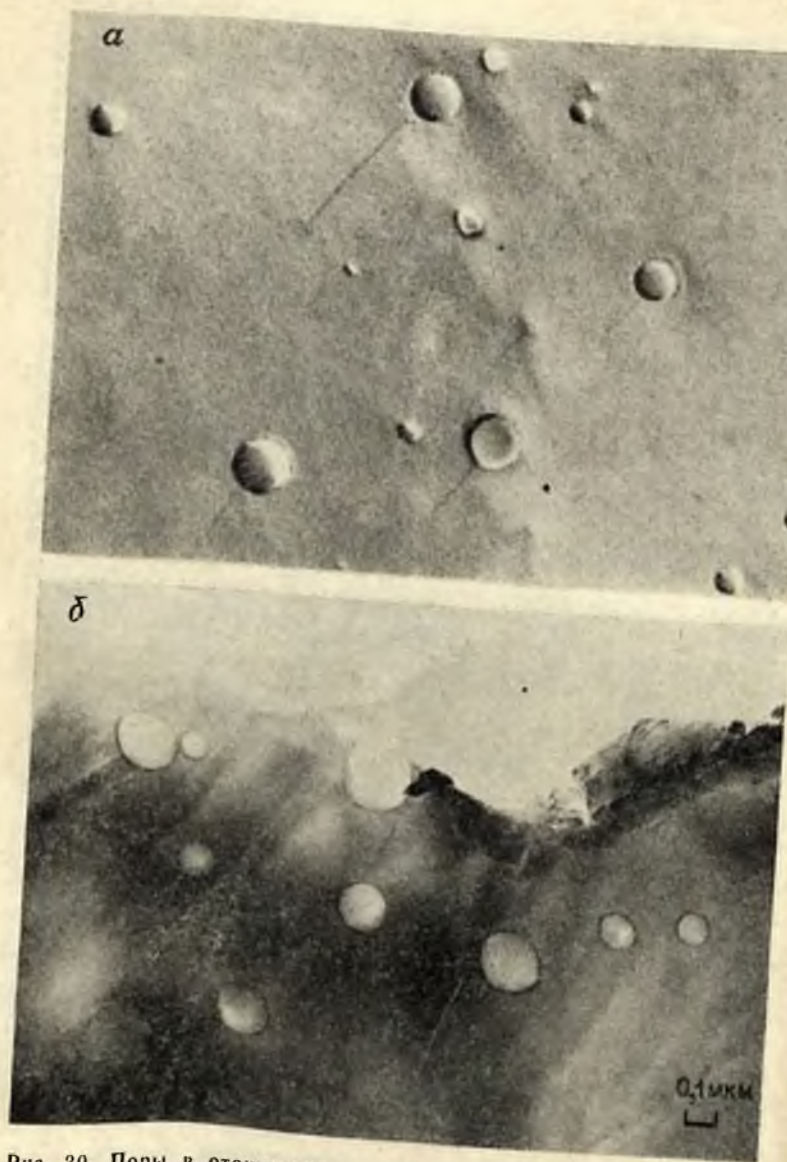


Рис. 30. Поры в отожженном синтетическом кварце с неструктурной примесью:

а — поры на поверхности скола (реплика), б — поры в осколке кварца

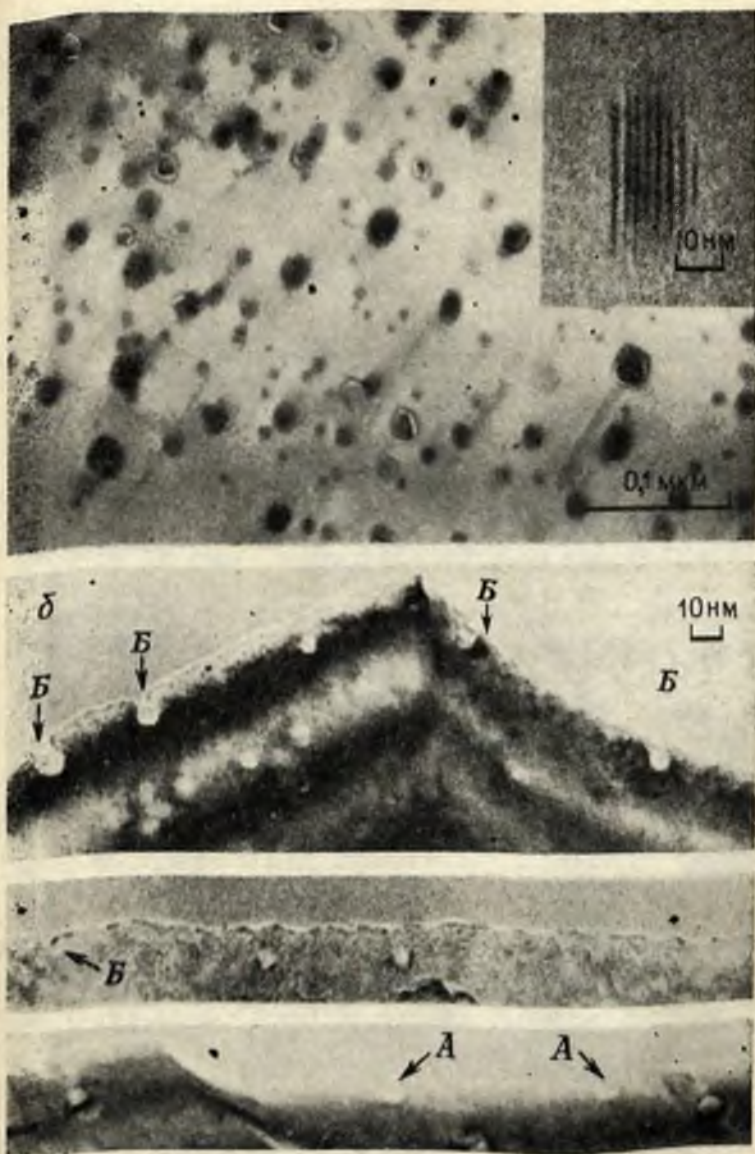


Рис. 31. Прямое изображение частиц НП в синтетическом зеленом (а) и буrom (б) кварце.

На врезке — высокоразрешающее изображение решетки твердого включения. Стрелками показаны: А — пустотки от частиц НП, Б — частицы НП

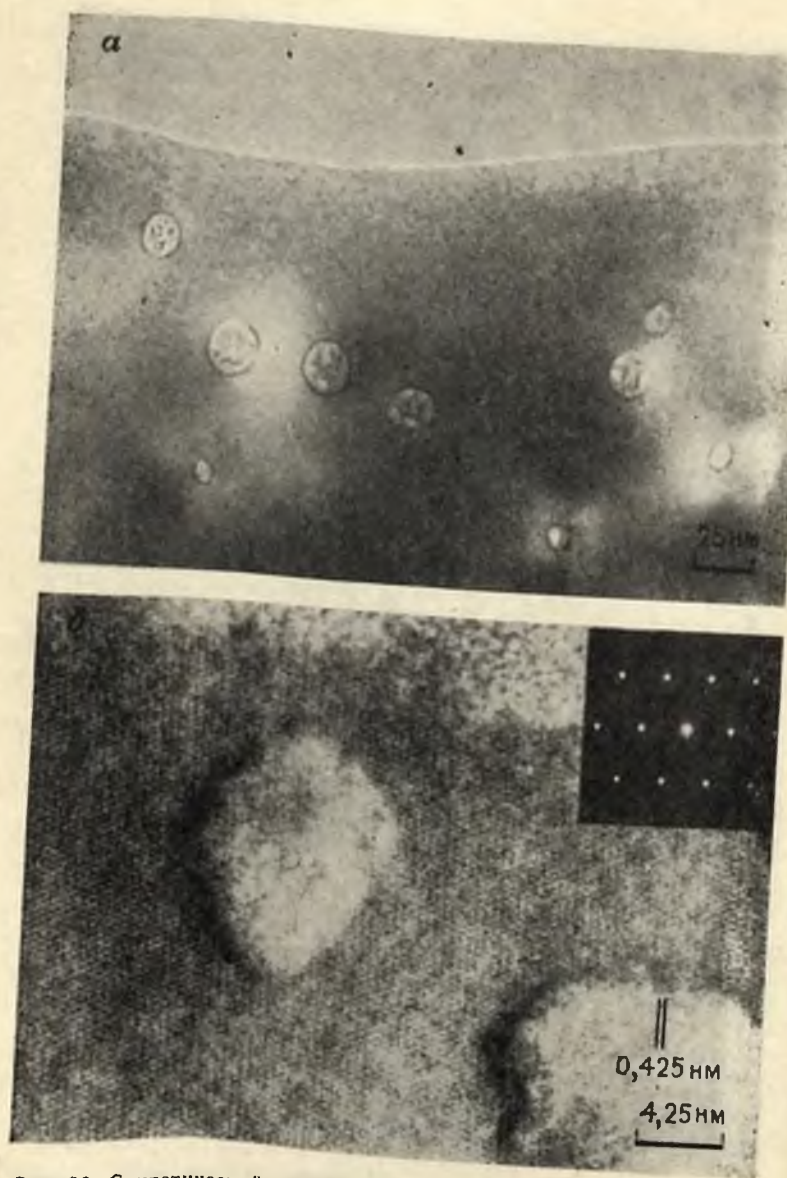


Рис. 32. Синтетический кварц с неструктурной примесью:
 а — голубой кварц; б — бурый; на врезке — картины микродифракции плоско-
 сти (1213)* обратной решетки кварца

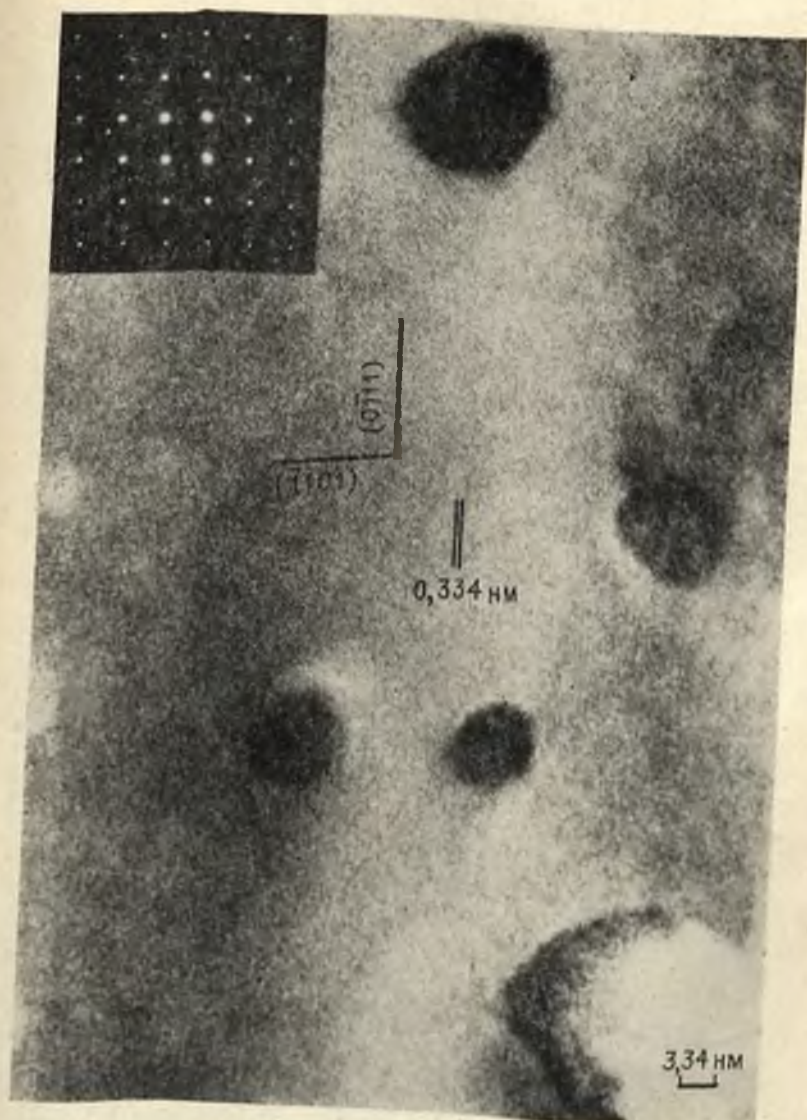


Рис. 33. Высокорастворяющее изображение решетки синтетического зеленого кварца.

На врезке — картина микродифракции плоскости, обратной решетки кварца, близкой к $(10\bar{1}1)$

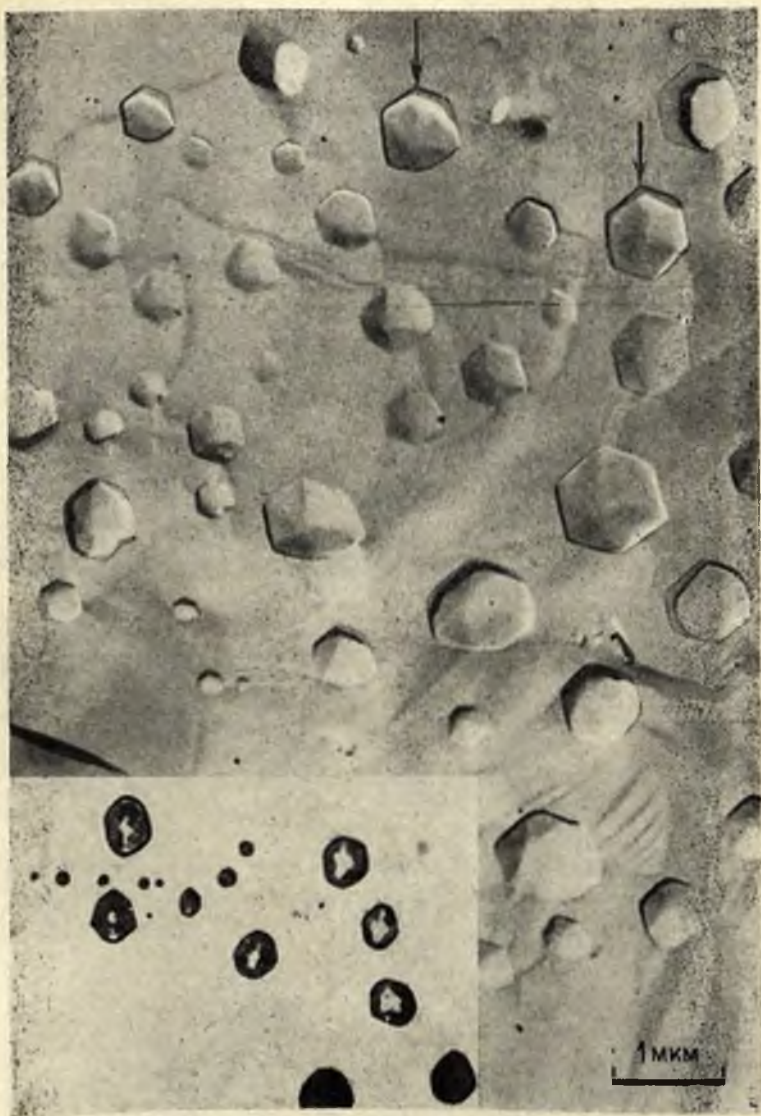


Рис. 34. Поры в природном кварце.

Решилка. Скол соответствует плоскости (0001). Стрелками показаны оболочки включений; на врезке слева — оптический снимок (Ув.Х3000). Зеленосланцевая кварцево-жильная формация. Средняя Азия. Кварц крупно-гигантозернистый непрозрачный

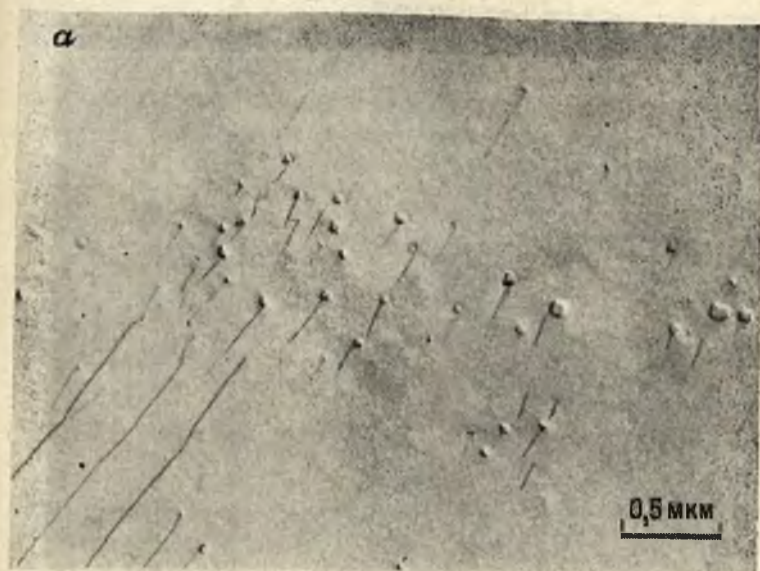


Рис. 35. Поры и субмикроскопические включения, распределенные вдоль залеченных трещин.
 Формация мусковитовых пегматитов, Карелия. Кварц гигантозернистый непрозрачный

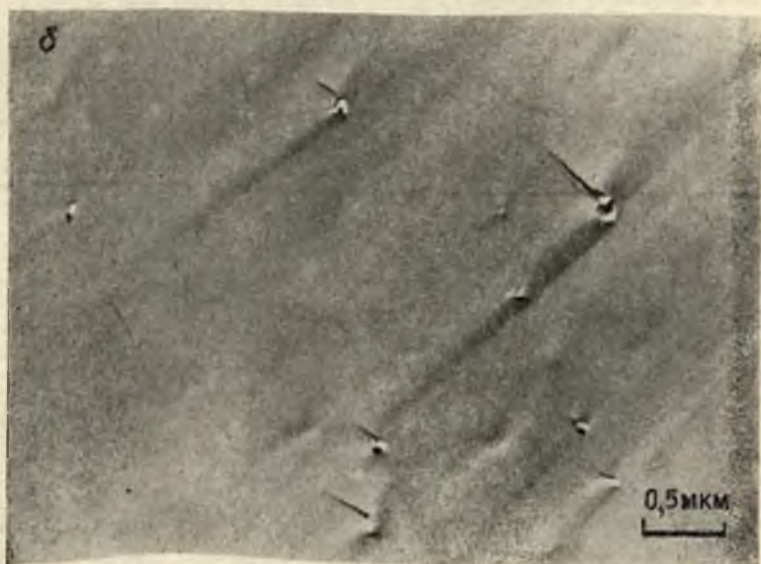
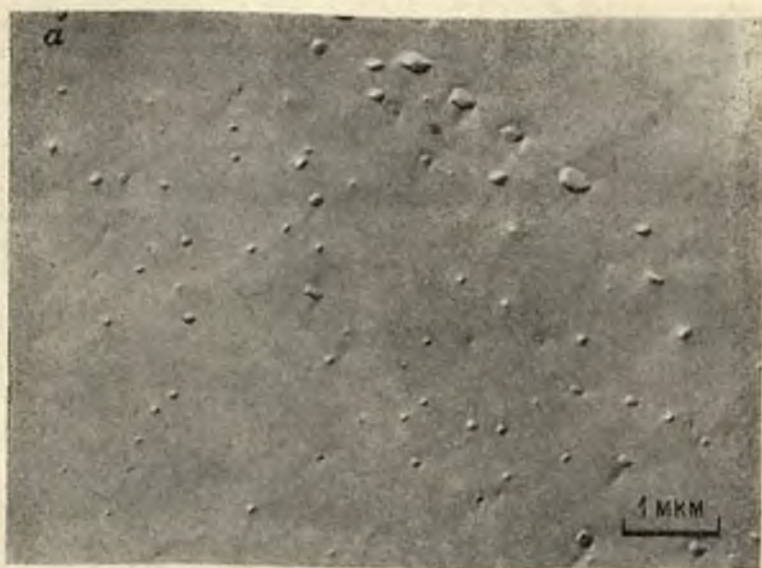


Рис. 36. Поры и субмикроскопические включения:

а — залеченная трещина расположена в плоскости изображения; *б* — твердые включения субмикроскопических размеров. Силектитовая формация Средний Урал. Кварц гранулированный мелкозернистый

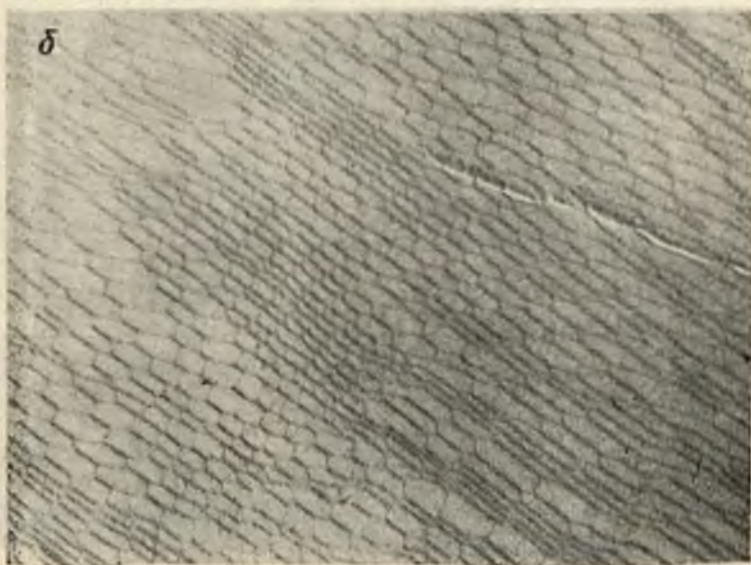
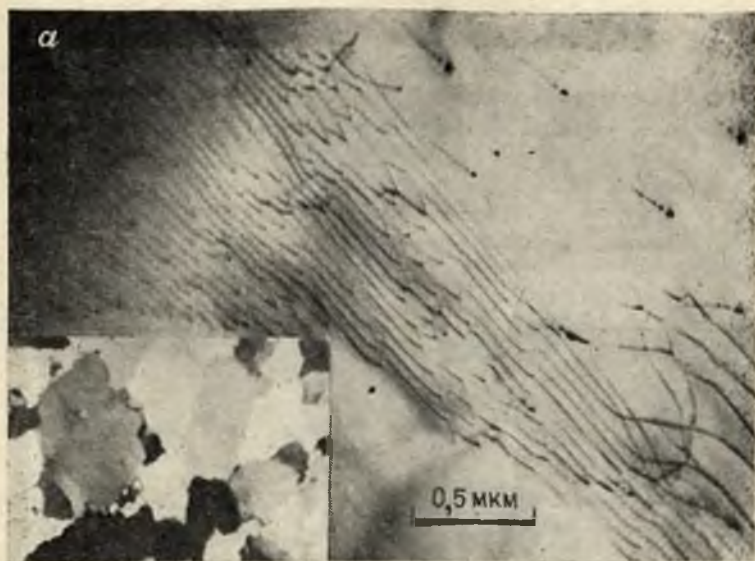


Рис. 37. Межкристаллитные границы вращения в льдистом кварце:
 а — дифракционный контраст, светлопольное изображение; нарезке оптиче-
 ский снимок льдистого кварца (Ув. $\times 40$); б — поверхность излома по межкри-
 сталлитной границе, реплика. Жадеит(эклогит)-сланцевая формация. Ка-
 захстан. Кварц льдистый микрозернистый

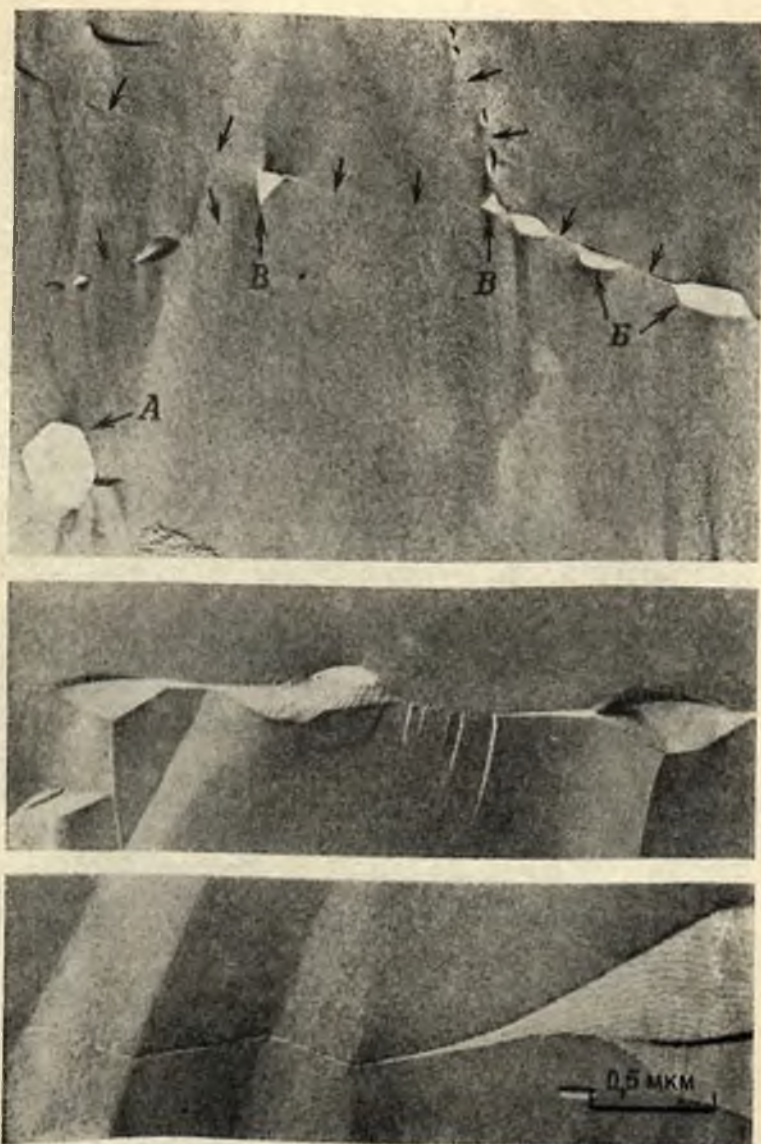


Рис. 38. Межкристаллитные границы (указаны стрелками) на сколах льдистого кварца.

Поры: А — в объеме, В — на границе, В — на «тройном стыке». Жадент(эклогит)-сланцевая формация. Казахстан. Кварц льдистый микрозернистый

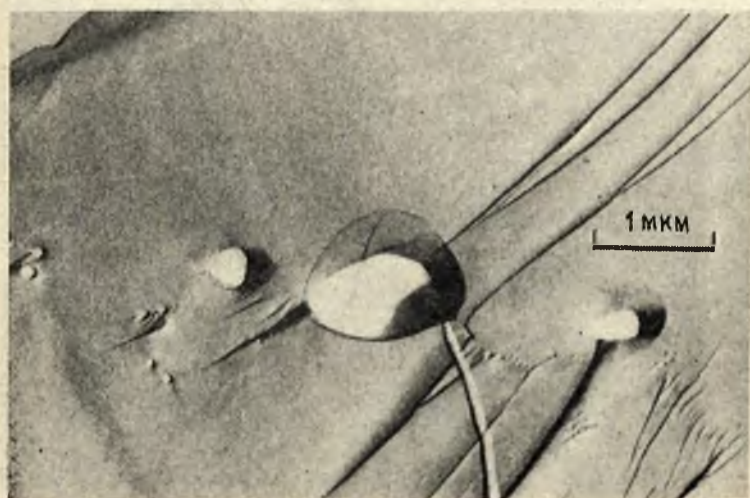
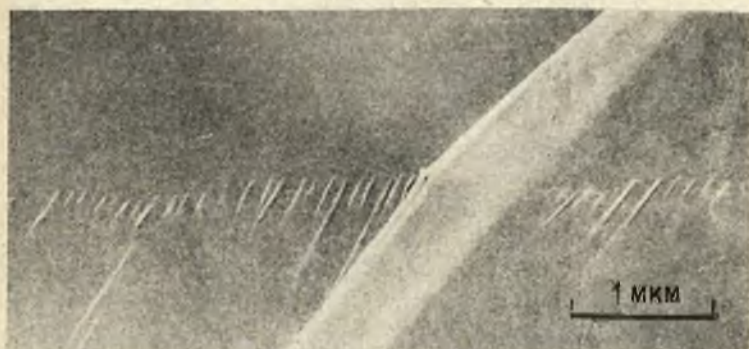


Рис. 39. Межкристаллитные границы на поверхности сколов природного кварца.

Эклогит-сланцевая формация. Башкирия. Кварц прозрачный крупнозернистый

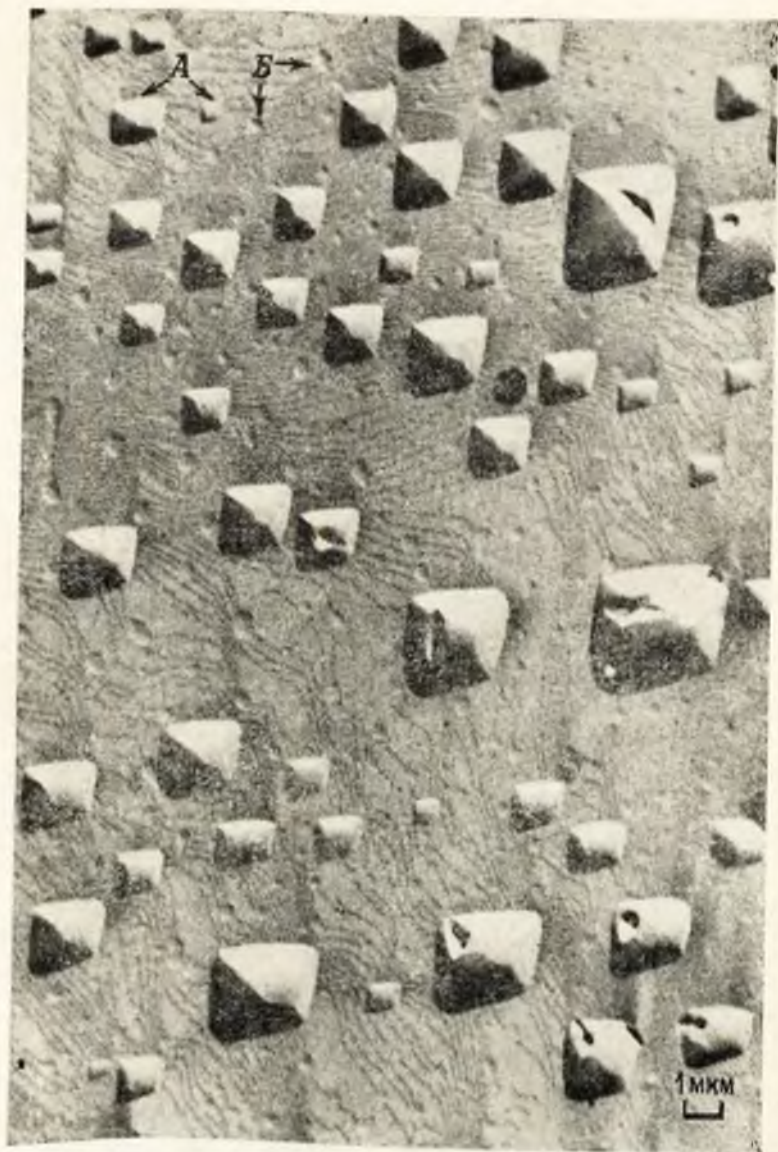


Рис. 40. Поверхность излома на межкристаллитной границе в природном кварце.

Стрелками указаны: А — поры, Б — следы газовой-жидкой фазы. Силектитовая формация. Средний Урал. Кварц гранулированный мелкозернистый



Рис. 41. Поверхность излома по межкристаллитной границе в природном кварце.

Силектитовая формация. Средний Урал. Кварц гранулированный мелкозернистый



Рис. 42. Поверхность излома по межкристаллитной границе в природном кварце частично выходящей на поверхность скола.
Хрустадено-пегматитовая формация Украина. Кварц гигантозернистый прозрачный



Рис. 43. Поверхность излома по межкристаллитной границе с очень малой разориентацией:

а — природный кварц; б — синтетический кварц (обр. В. Е. Хаджи)

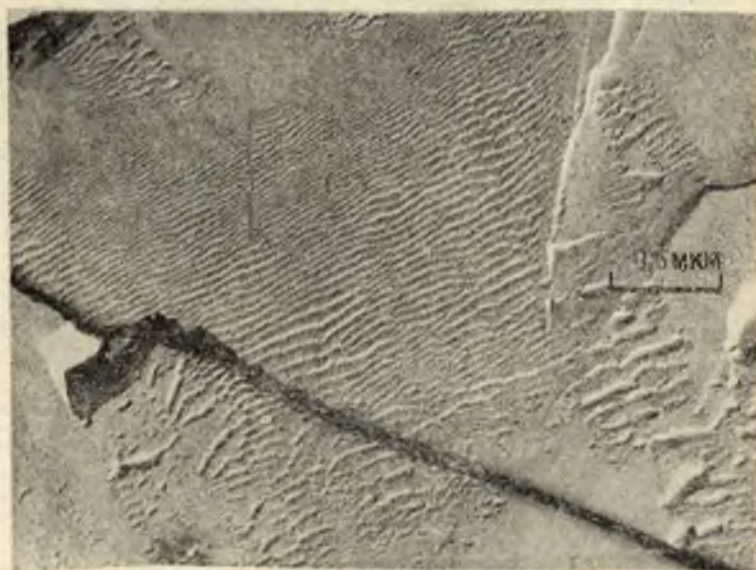
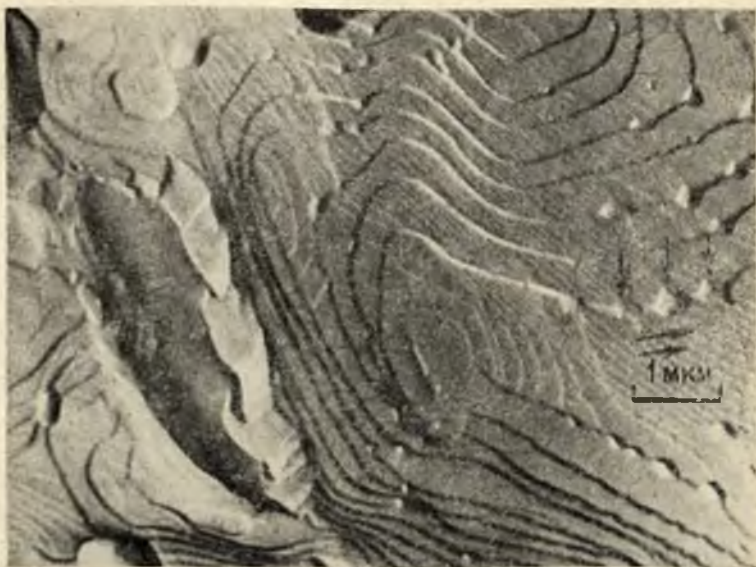


Рис. 44. Поверхность излома по межкристаллитной границе в природном кварце.

Стрелками показаны поры, напизанные на дислокации — ступеньки. Зелено-сланцевая кварцево-жильная формация. Средняя Азия. Кварц гигантозернистый непрозрачный

Рис. 45. Периодическое распределение вещества на поверхности скола.

Жадент (эклогит)-сланцевая формация. Казахстан. Кварц льдистый мелкозернистый

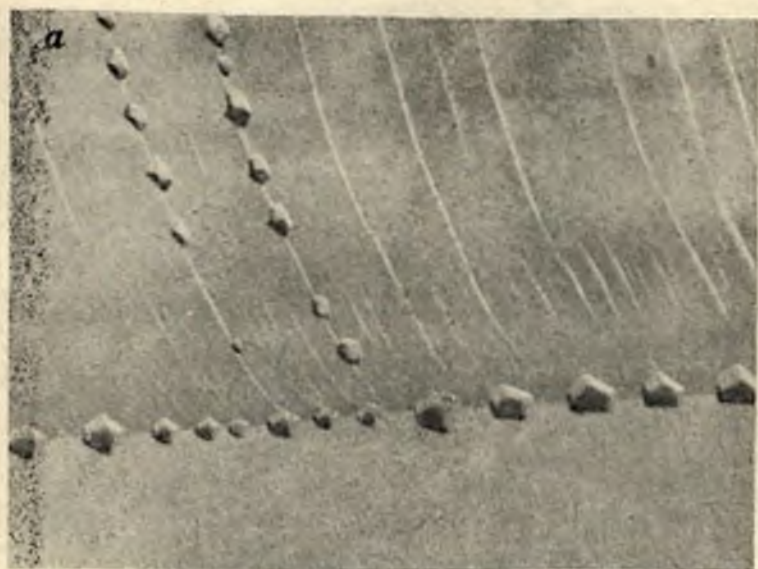


Рис. 46. Поверхности скола кварца.

Примеры возможной ошибочной интерпретации межкристаллитных границ
Хрусталеносная кварцево-жильная формация. Приполярный Урал. Кварц ги-
гантозернистый прозрачный



Рис. 47. Образование сосулек на межкристаллитных границах при травлении в 40 %-ном HF:

а — время травления 20 мин; б — 30 мин. Хрусталеносно-пегматитовая формация, Украина. Кварц крупногигантозернистый полупрозрачный

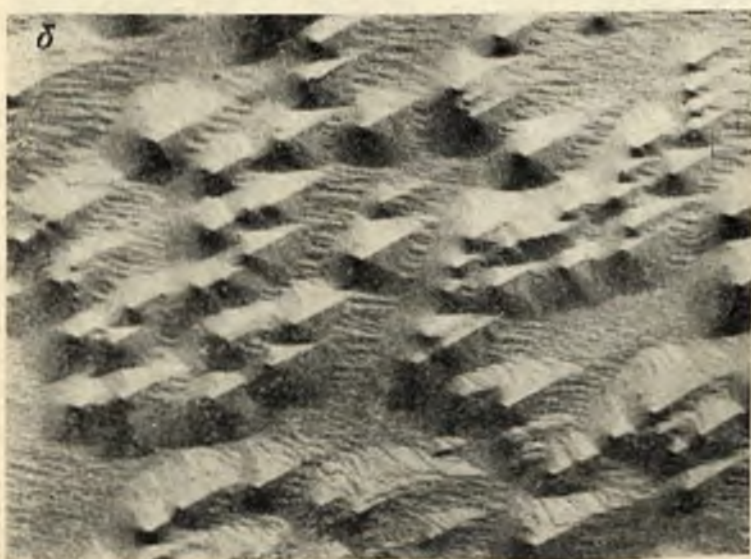


Рис. 48. Ямки природного травления.

Силекситовая формация. Средний Урал. Кварц гигантозернистый непрозрачный

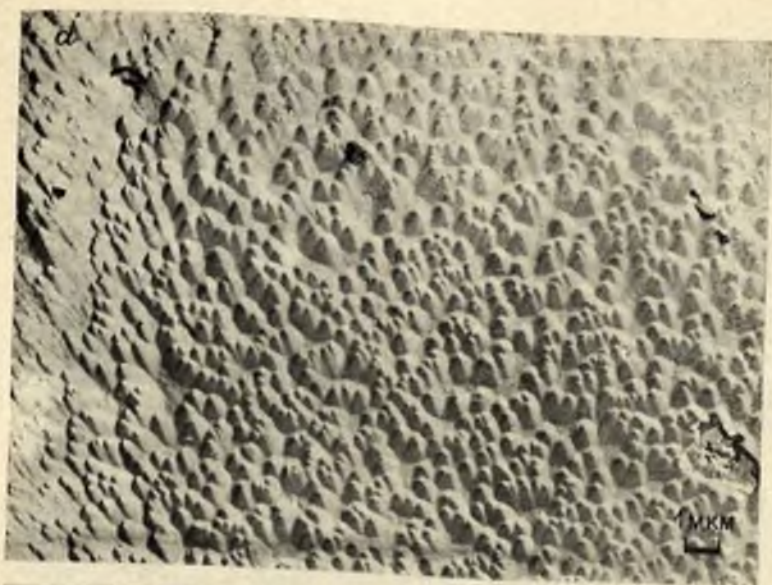


Рис. 49. Ямки природного травления:
 а — по всей поверхности излома; б — свежая поверхность скола. Силекситовая формация. Средний Урал. Кварц гигантозернистый прозрачный



Рис. 50. Ямки травления на кварце:

а — синтетический кварц, травление в 40%-ном водном растворе HF; *б* — природное травление



Рис. 51. Грубая скульптура роста на поверхности кварца:
а — синтетический кварц; *б* — природный кварц

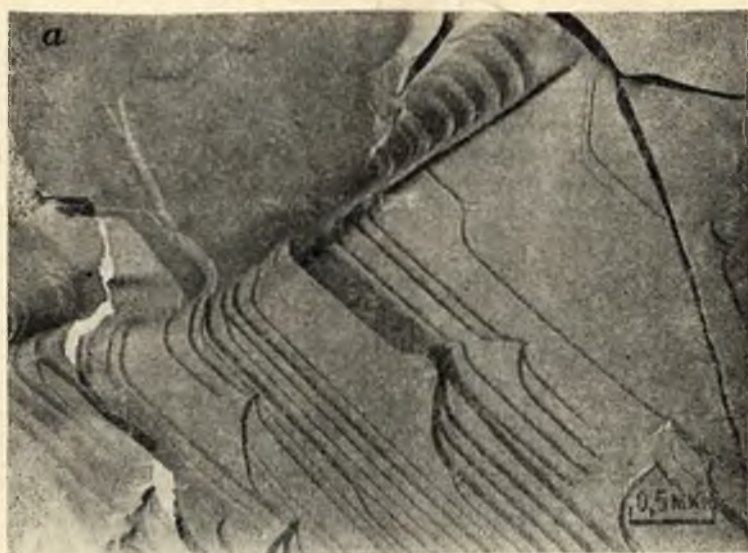


Рис. 52. Ступени роста на поверхности кварца:
а — синтетический кварц; *б* — природный кварц. Кварц гранулированный мелкозернистый

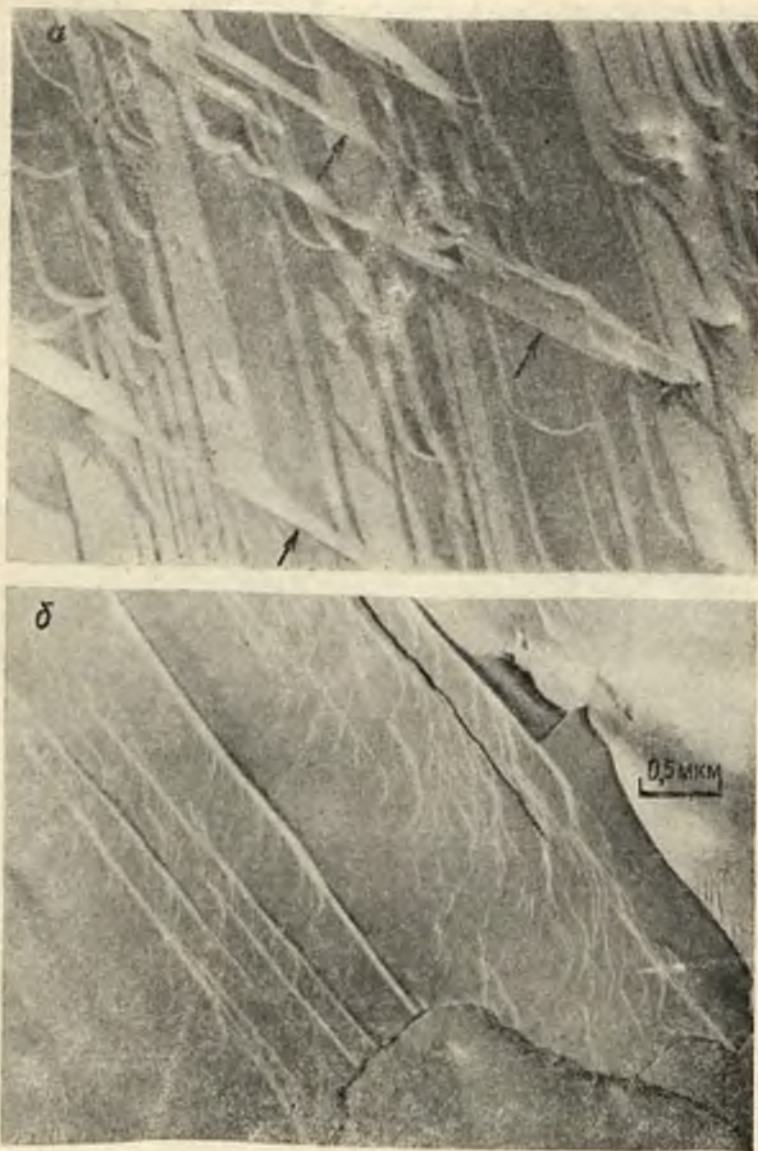


Рис. 53. Ступени роста на поверхности кварца:
 а — синтетический кварц, стрелками указаны бразильские двойники; б — природный кварц

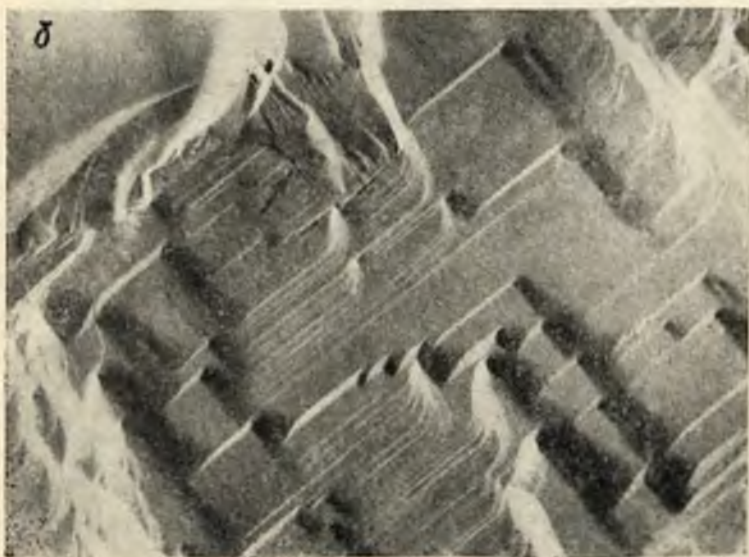


Рис. 54. Ступени роста на поверхности кварца:
а — синтетический кварц; *б* — природный кварц

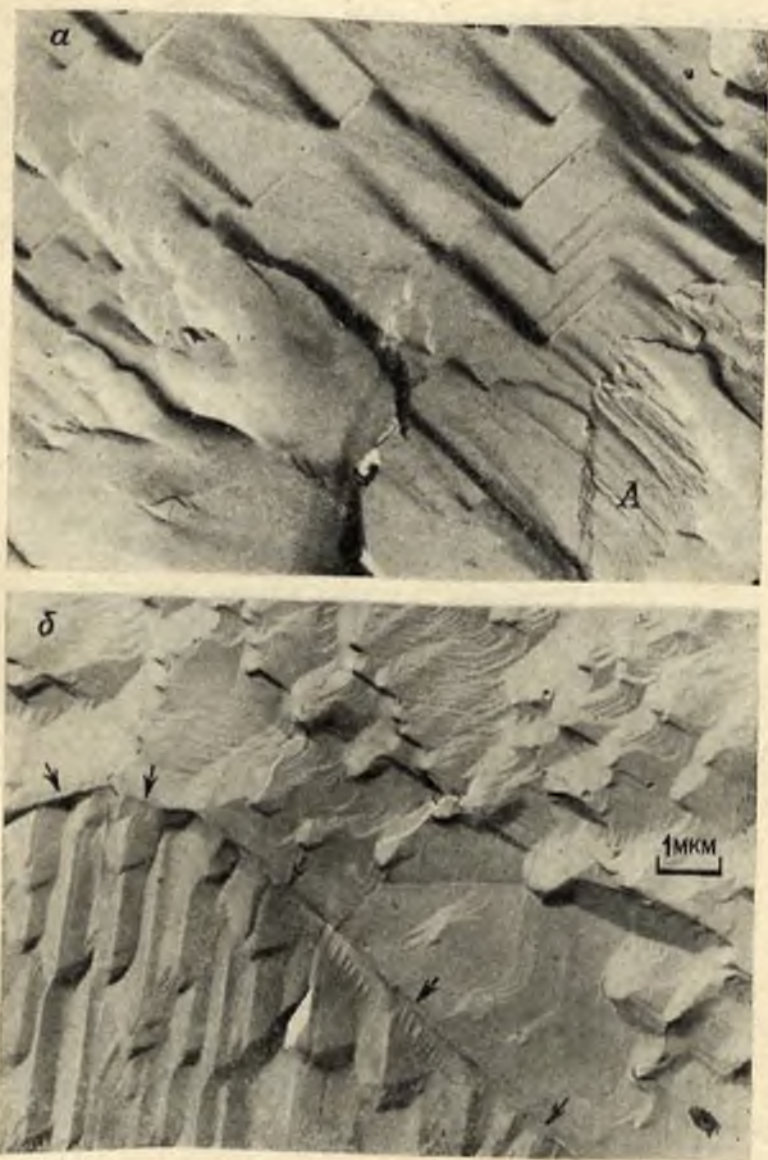


Рис. 55. Фигуры роста на поверхности природного кварца.

Буквой А обозначен участок излома по межкристаллитной границе. Стрелками показана межзернистая граница Силекситовая формация. Средний Урал. Кварц гигантозернистый непрозрачный



Рис. 56. Фигуры роста — растворения в природном кварце.

Буквой А обозначены участки поверхности излома вдоль реликтовой микро-трещины. Силекситовая формация. Средний Урал. Кварц гетерозернистый не-прозрачный

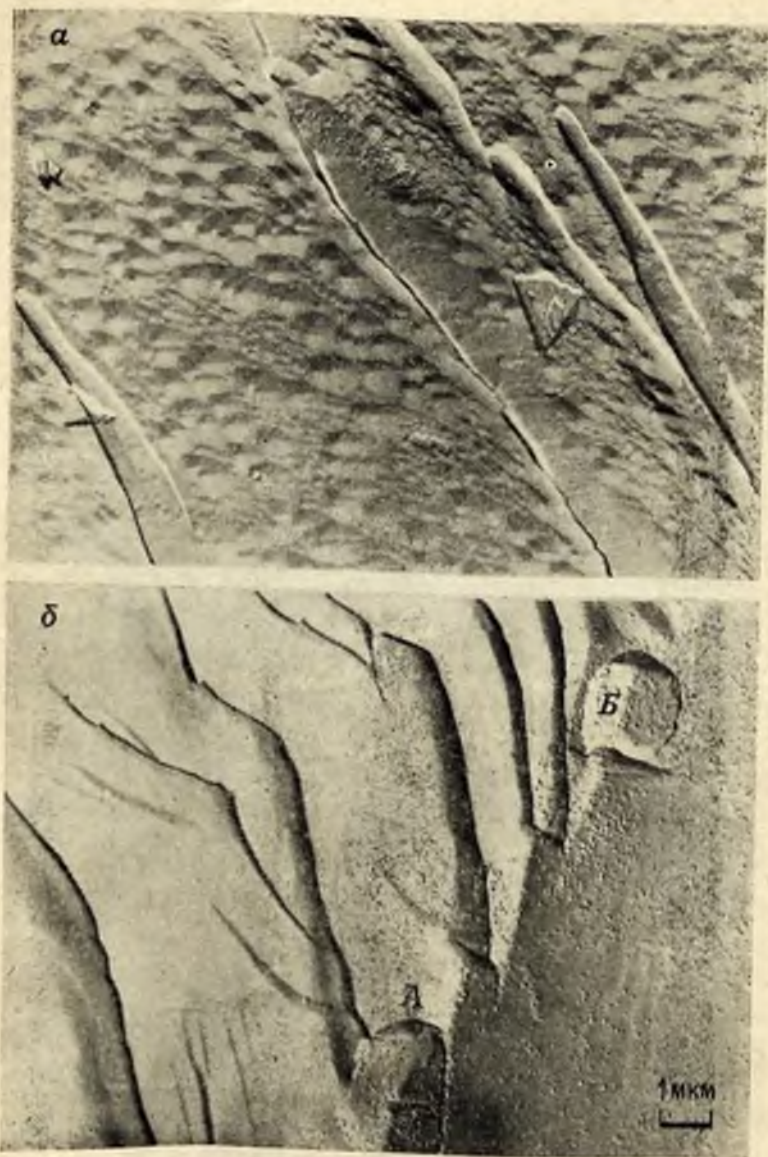


Рис. 57. Поверхности излома вдоль реликтовых микротрещин.
Силектитовая формация Средний Урал. Кварц гранулированный мелкозер-
нистый



Рис. 58. Поверхности излома реликтовых трещин:

а — заполнение полосы трещины флюидом высокой концентрации; б — α - β трансформация кварцевой породы с одновременной ее коррозией. Стрелкой указано направление отщепления; буквой Д обозначены дофинейские микродвойники; цифрами — кварцевые зерна. Мусковит-пегматитовая формация. Карелия. Кварц гетерозернистый непрозрачный

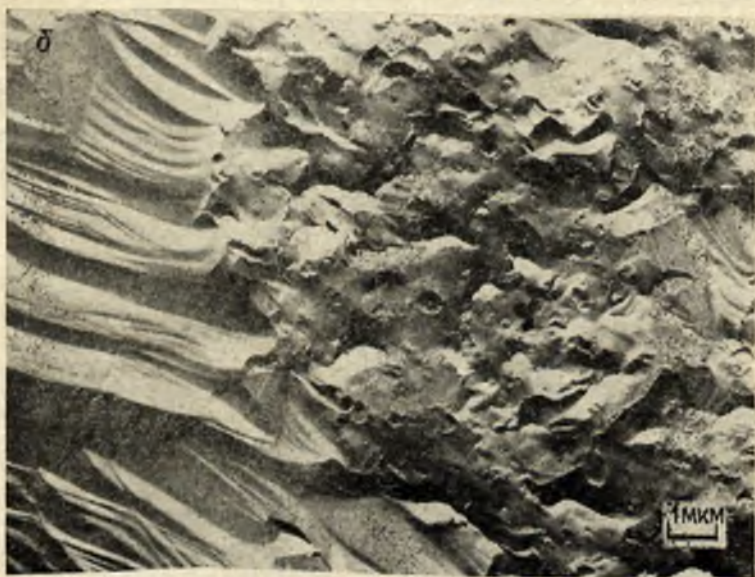
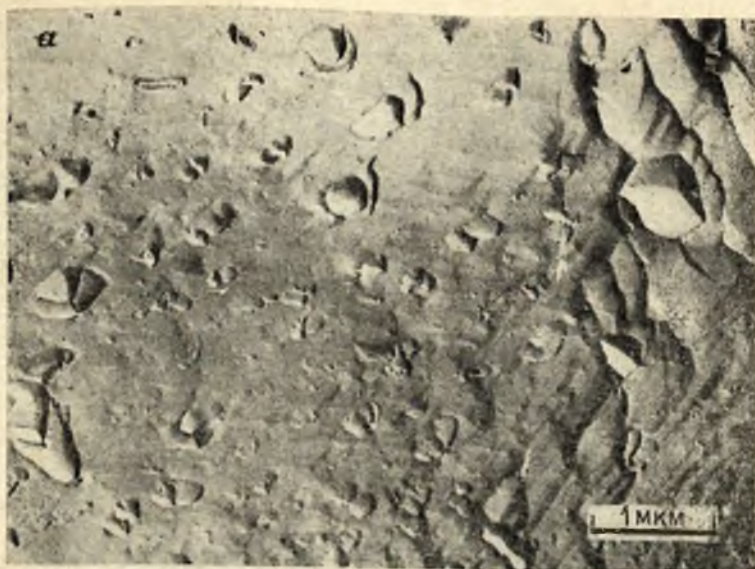


Рис. 59. Поверхности излома кварца по реликтовым микротрещинам.

Ориентировка поверхностей близка к плоскости (0001). Слюдонсно-пегматитовая и силектитовая формация. Средний и Южный Урал. Кварц гранулированный среднезернистый



Рис. 60. Реликтовые микротрещины:

а — поверхность излома вдоль реликтовых микротрещин параллельна плоскости изображения, *б* — след реликтовой микротрещины на поверхности скола. Силекситовая формация. Средний Урал. Кварц гигантозернистый полупрозрачный

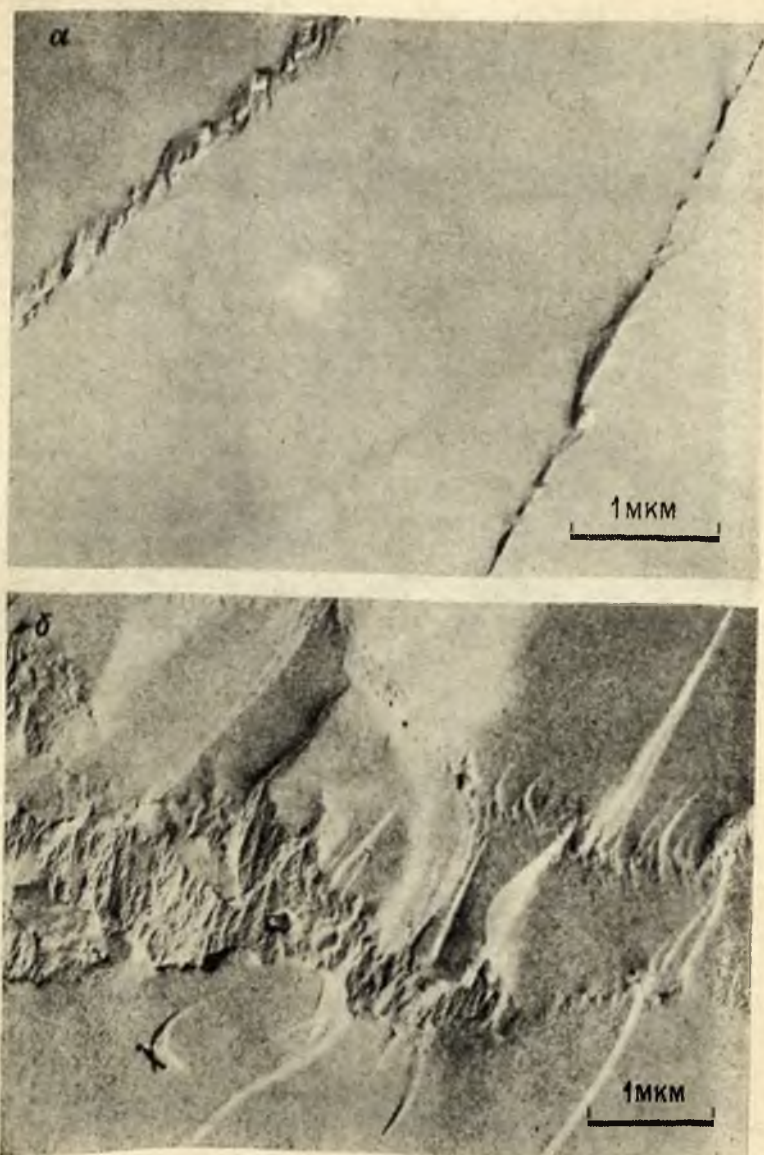


Рис. 61. Следы реликтовых микротрещин на поверхностях сколов:
 а — силекситовая формация (Средний Урал. Кварц гранулированный мелко-
 зернистый); б — силекситовая формация (Средний Урал. Кварц крупнозер-
 нистый подупрозрачный)



Рис. 62. Поверхность излома вдоль реликтовой микротрещины.
Силекситовая формация. Средний Урал. Кварц гигантозернистый непрозрачный



Рис. 63. Поверхность излома вдоль реликтовой микротрещины. Мусковит-пегматитовая формация. Карелия. Кварц гигантозернистый непрозрачный



Рис. 64. Поверхность излома вдоль реликтовой микротрещины.
Силекситовая формация. Средний Урал. Кварц гигантозернистый непрозрач-
ный



Рис. 65. Поверхность излома вдоль реликтовой микротрещины, частично выходящей на поверхность скола. Силекситовая формация. Средний Урал. Кварц гранулированный мелкозернистый

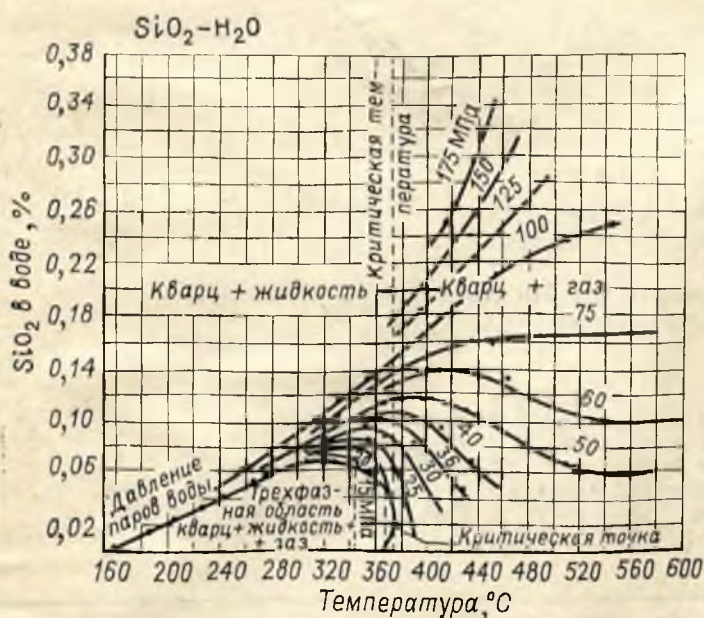


Рис. 66. Поверхность излома вдоль реликтовой микротрещины, частично выходящей на поверхность и изобары растворимости кварца по данным Г. К. Кеннеди.

На врезке вверху — гидратированная поверхность кварца ($T=150^\circ\text{C}$, $P=5 \cdot 10^6$ Па). Формация метаморфогенных мусковитовых пегматитов. Средний Урал. Кварц гранулированный среднезернистый

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Формации кварцевых образований	5
Методы исследований и приготовление препаратов	15
Основные типы поверхностей сколов монокристалльного кварца	18
Дефекты на поверхностях сколов кварцевых зерен	22
Газово-жидкие включения	22
Твердые включения	27
Субмикроскопические включения и поры	34
Поверхности раздела кварца	39
Межкристаллитные границы	39
Межзерновые границы	44
Реликтовые микротрещины	47
Заключение	51
Список литературы	54

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Балакирев Владимир Георгиевич
Мельников Евгений Павлович

ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ ФРАКТОГРАФИЯ КВАРЦА

Заведующий редакцией *О. И. Паркани*
Редактор издательства *Л. А. Журавлева*
Обложка художника *В. И. Казаковой*
Художественный редактор *Г. Н. Юрчевская*
Технический редактор *Н. В. Жидкова*
Корректор *Г. Л. Петушкова*
Н/К

Сдано в набор 11.11.90. Подписано в печать 17.09.91. Формат 60×90^{1/16}.
Бумага кл. журн. Гарнитура Литературная. Печать высокая.
Усл. печ. л. 7,5. Усл. кр. отт. 7,75. Уч.-изд. л. 7,65. Тираж 3000 экз.
Заказ 523/12891-2. Цена 1 р. 50 к

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра»
125047, Москва, Тверская застава, 3.
Ленинградская картографическая фабрика ВСЕГЕИ
199178, Санкт-Петербург. Средний пр., 72.

НЕДРА