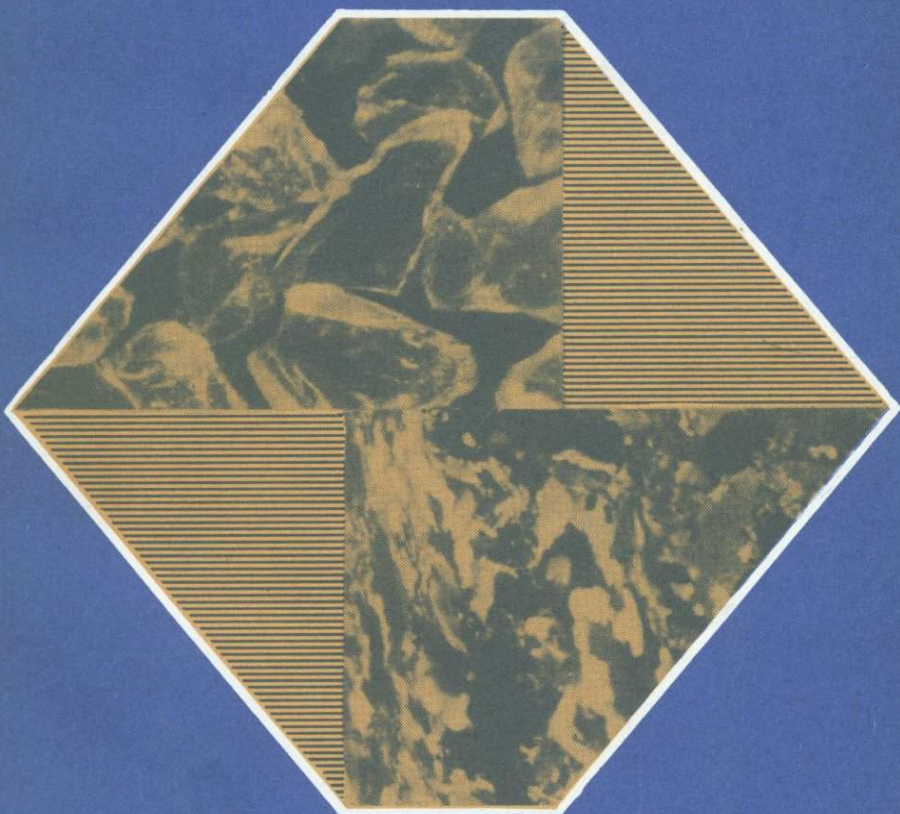


И.С. ДЕЛИЦИН

Структурообразование
кварцевых
пород



· НАУКА ·

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ,
ПЕТРОГРАФИИ, МИНЕРАЛОГИИ И ГЕОХИМИИ

И.С. ДЕЛИЦИН
**Структурообразование
кварцевых
пород**

Ответственный редактор
Е.П. Малиновский

4409



МОСКВА
"НАУКА"
1985



Д е л и ц и н И.С. Структурообразование кварцевых пород. М.: Наука, 1985.

Рассматриваются физические основы структурообразования мономинеральной кварцевой породы в условиях осадкообразования и метаморфизма. Показано, что "приспособление" любого кристаллического агрегата к варьирующим условиям среды и внешнего воздействия может быть объяснено через раскрытие и описание реакции анизотропных упругих свойств слагающих его индивидов на изменение внешних условий.

Книга может быть полезной широкому кругу специалистов, работающих в области петрографии, литологии, структурной геологии, кристаллофизики, металлофизики, физического материаловедения, синергетики, системологии, а также студентам высших курсов и аспирантам соответствующих специальностей.

Ил. 66. Табл. 6. Библиограф. 167 назв.

Рецензенты

О.В. Сидоренко, В.Ф. Чернышев

ПРЕДИСЛОВИЕ

Большие технические возможности, которыми располагают в настоящее время науки о Земле, позволяют получить обильный фактический материал. Интенсивное накопление материала обгоняет возможности его теоретического осмысления. В сложившейся ситуации трудно отобрать из существующих представлений основное, следуя которому можно было бы вести целенаправленное решение тех или иных геологических проблем. Поэтому весьма актуальной становится разработка основ теории эволюции земной коры — истории неорганического тела нашей планеты от архея до наших дней — одной из коренных проблем современной геологии.

Эволюция земной коры может быть установлена через эволюцию слагающих ее геологических объектов, а последних — через минеральный состав и структурные особенности слагающих горных пород. Весь круговорот минеральной массы в осадочном, метаморфическом и магматическом циклах развития земной коры, вся совокупность процессов, предопределяющих ее развитие, находит свое отражение в минеральном составе и структурных признаках горных пород. Если для изучения минеральных преобразований исследователи имеют достаточно развитый теоретический аппарат, то в изучении изменения структурных особенностей их возможности ограничены, а успехи более скромные.

В работах, посвященных структурам минеральных агрегатов, остро ощущается различная направленность исследований, проводящихся специалистами различных профилей. Внешние успехи интерпретации структур минеральных агрегатов (значительное количество публикуемых атласов, определителей и монографий) отражают, как правило, лишь качественный, феноменологический уровень исследования [75, 76 и др.]. Новые направления в изучении таких структур связаны с выявлением возможных связей структурных особенностей агрегатов с процессами минералообразования [7 и др.], извлечением генетической информации из топологических особенностей агрегатов [51, 52 и др.], моделированием с помощью ЭВМ пространственной ориентировки слагающих горные породы минералов [144 и др.], а также с попытками привлечь устоявшиеся представления физического материаловедения [14, 159 и др.]. Подобные исследования определяют развитие современных представлений о структурообразовании минеральных агрегатов. Но и в указанных работах пока еще недостаточно полно освещены подробности, необходимые для четкого научного понимания сущности одной из главных проблем современной петрографии — структурообразования кристаллических агрегатов.

Успешное решение проблемы структурообразования минеральных агрегатов, по мнению автора, практически невозможно без углубленного

исследования поведения слагающих агрегат минеральных зерен. Разнообразные физические и химические изменения, которые претерпевают минеральные индивиды в процессе развития агрегата, составляют основное содержание проблемы формоизменения (поведения) индивида в кристаллическом агрегате при меняющихся внешних условиях. Вместе с тем данная проблема не исследуется так широко, как того требуют насущные задачи теоретической и прикладной минералогии. Исследования встречаются трудности, заключающиеся в том, что изменение формы минерального индивида в агрегате в различных геологических условиях связано с развитием ряда "частных" процессов — от растворения и роста до пластической деформации и рекристаллизации. Физическая сущность подобных изменений выявлена недостаточно, что обусловлено отсутствием конкретных данных по конкретным процессам. Современное состояние атомной и молекулярной теории также не дает оснований для надежных реконструкций прошлого и предсказания поведения кристаллических индивидов в агрегате в изменяющихся внешних условиях.

Сказанное отчетливо показывает, что достоверно расшифровывать "закодированную" геологическую информацию, "накопленную" в структурных особенностях кристаллических агрегатов за период их образования и последующего развития, мы практически не можем, поскольку недостаточно полно представляем физическую сущность рассматриваемых явлений. Последнее, естественно, неблагоприятно сказывается на изучении всех аспектов проблемы структурообразования — практическом, научно-познавательном и философском.

Для дальнейшего углубленного изучения горных пород, руд и минеральных агрегатов, по-видимому, нужны работы, специально посвященные исследованию физического аспекта — причин, условий, процессов и механизмов — структурообразования кристаллических агрегатов. Такая работа и выносится на суд читателей.

Проблемы формоизменения индивида в агрегате и структурообразования кристаллического агрегата в изменяющейся геологической среде рассматриваются в предлагаемой книге на примере мономинеральной породы; в этом случае исключаются возможные минеральные преобразования, усложняющие изучение структурных изменений. В работе рассматриваются структурные изменения в основном мономинеральных кварцевых пород, так как физико-химические свойства кварца, минерала с ионно-ковалентным типом связей, достаточно полно изучены в связи с широким использованием его в современной технике [63 и др.], а структурные особенности кварцевых пород изучаются уже более полувека — с момента возникновения микроструктурного анализа [78, 153 и др.].

Работа выполнена на основе оригинальных материалов, поскольку автор на протяжении ряда лет принимал участие в исследованиях физико-механических свойств кварца и структурных особенностей кварцевых пород [25—44 и др.]. Выбор объекта исследования predetermined название работы, хотя круг затрагиваемых в ней проблем значительно шире.

В предлагаемой книге последовательно рассматриваются поведение породообразующего кварца и структурные изменения (структурообразование) кварцевых пород в широком интервале температур и давлений —

от возникновения исходного осадка до его преобразования в условиях метаморфизма.

Изучение структурообразования кварцевого агрегата проводится на основе единой системы теоретико-познавательных принципов и основных понятий. Широкое привлечение данных эксперимента, комплексное применение современных методов исследований, учет анизотропии упругих свойств реального материала и интерпретация полученных результатов на основании принятых методологических принципов и понятий, использование достижений современной физики позволили, как мы полагаем, избежать умозрительных заключений и составить обоснованное, внутренне непротиворечивое представление о сущности структурообразования монокварцевых пород. Полученные результаты достаточно просты, чтобы их понять, не прибегая к математике.

Предлагаемая работа состоит из введения, разделов, посвященных методике исследования и описания основных свойств кварца, двух основных частей, раздела, в котором обсуждаются полученные результаты, и заключения. Во "Введении" рассматриваются в основном системы методологических принципов и научных понятий, положенные в основу работы. В разделе "Методика исследования" приведены сведения о примененных в работе стереометрических, петрографических, рентгеновских и других методах исследования, позволяющих выявлять как строение изучаемых пород, так и пространственную ориентировку слагающих их индивидов. Свойства кварца рассмотрены кратко в объеме, необходимом для понимания явления. В первой, основной части работы рассмотрены структуры осадочных пород: возникновение ориентированного строения песков в условиях опыта, природные седиментационные структуры, структурные особенности литифицированных пород и природа процессов, предопределяющих это явление. Часть вторая книги посвящена структурным особенностям метаморфизованных пород: рассматриваются закономерности развития деформационных и рекристаллизационных структур, уточняется природа указанных явлений.

В разделе "Обсуждение результатов" показано, что существует глубокая общность между отдельными "частными" процессами, предопределяющими формоизменение минерального зерна в породе, и это наглядно отражает установленный "фактор анизотропии индивида". Сущность этого фактора — реакция индивида на изменяющиеся внешние условия в первую очередь предопределяется и контролируется анизотропией его упругих свойств. Все изменения минерального зерна в породе — от его зарождения до уничтожения — контролируются указанным фактором.

Фактор анизотропии — основополагающий и при уточнении геологической сущности структурных преобразований кварцевой породы.

Установленные для существенно кварцевых пород закономерности и законы имеют общий характер и в принципе могут быть использованы для объяснения процессов, протекающих в любых кристаллических породах и рудах, находящихся в условиях гравитационных, термических и тектонических полей коры и мантии Земли, а также наблюдаемых в искусственных кристаллических материалах, сложенных упруго-анизотропными индивидами. Анализируя полученные данные, автор приходит к выводу о возмож-

ности их привлечения к объяснению структурообразования различных геологических объектов земной коры.

В разделе обосновывается представление о принципе структурности — основополагающем правиле исследования структурообразования вещественных геологических объектов.

В "Заключении" указано, что совокупность фактора анизотропии, закономерности поведения геологических объектов в изменяющихся условиях среды и принципа структурности можно рассматривать в качестве реальной основы для создания общей теории структурообразования.

Автор надеется, что изложенные в книге идеи будут стимулировать усилия исследователей, изучающих проблему структурообразования материального мира. В этом плане большая часть книги может оказаться полезной для широкого круга специалистов, работающих в различных областях естественных наук. Автор понимает, что предлагаемая книга не свободна от недостатков и заранее благодарит за критические замечания и конструктивные предложения, направленные на дальнейшее решение поставленной проблемы.

Настоящая работа выполнена в отделе неметаллических полезных ископаемых Института геологии рудных месторождений; петрографии, минералогии и геохимии АН СССР. Автор приносит руководителю отдела проф. В.П. Петрову и коллегам по отделу глубокую признательность за неоднократные критические обсуждения рукописи данной работы, выражает искреннюю благодарность сотрудникам лаборатории структур рудных полей и месторождений, а также всем, принимавшим участие в уточнении и обсуждении отдельных аспектов проблемы структурообразования.

Сердечная благодарность кандидату физико-математических наук Л.Д. Лившицу, взявшему на себя труд критического просмотра первого варианта рукописи, и кандидату геолого-минералогических наук Е.П. Малиновскому, оказавшему существенную помощь при подготовке рукописи к печати.

ВВЕДЕНИЕ

Основная цель книги — разработать пути решения проблемы структурообразования минеральных агрегатов, руд и горных пород на примере изучения существенно кварцевых пород. Важность проблемы предопределяется необходимостью упорядочить существующую совокупность фактов о структурообразовании геологических объектов, повысить степень надежности получаемой информации и достоверности познания в геологии.

Результаты изучения структурных признаков широко используются геологами при решении обширного круга проблем, начиная от палеогеографических реконструкций, связанных с расшифровкой крупных структур регионов, до уточнения вопросов генезиса мельчайших деталей строения месторождений самых различных полезных ископаемых. Однако несмотря на совершенствование методов изучения структур кристаллических агрегатов, интерпретация полученных результатов продолжает оставаться весьма неопределенной. Многие исследователи приходят к выводу, что итоги изучения в настоящее время не могут быть использованы для решения конкретных геологических задач [89, 161 и др.]. Это — неизбежный результат исторически сложившегося в геологии положения, при котором для восстановления единого хода истории развития объекта, когда из множества возможностей реализуется лишь одна, предлагается множество восстанавливающих его моделей, степень достоверности которых весьма неопределенна. Последнее неудивительно, так как, не раскрыв сущности явлений, практически невозможно расшифровать "язык", на котором природа сообщает нам о событиях прошлого.

Это весьма отчетливо иллюстрируют существующие данные о структурных изменениях, взятых для исследования наиболее изученных в структурном плане кварцевых пород.

Обращаясь к литературным источникам [23, 74, 80 и др.], можно составить следующее представление об основных чертах структурообразования кварцевых пород в условиях метаморфизма погружения. В процессе выветривания исходных кварцосодержащих пород образуется обломочный кварц. В ходе транспортировки вещества и седиментации на земной поверхности формируются высокопористые обломочные осадки — пески. Вследствие погружения под воздействием вышележащих пород и возрастающей температуры (тепловой поток из недр Земли) исходный осадок уплотняется, превращаясь, в конечном итоге, в плотную породу. На основе морфологических признаков можно выделить четыре основных типа структур кварцевых пород: два для осадочных пород и два для пород метаморфизованных.

Структуры рыхлых осадочных пород — седиментационные, класти-

ческие, обломочные, характеризуются несоответствием границ одного зерна границам соседнего; это обуславливает наличие в породе пор и полостей. Для указанного типа структур характерно, что каждое обломочное зерно образовано вне данной породы и только потом, в результате процессов седиментации, заняло свое место в строении рыхлого агрегата.

В существующих публикациях о плотных осадочных породах обычно подробно рассматриваются лишь структуры, формирование которых связывается с развитием элементов растворения под давлением и регенерации [74 и др.]; указанными причинами объясняют и источник SiO_2 , и процесс изменения пористости при постседиментационных преобразованиях. Существует мнение, что таким путем в зоне эпигенеза кластическая структура исходной породы преобразуется в типичную для песчаников гранобластовую структуру. Указанная структура образована кристаллическими зернами кварца, плотно примыкающими друг к другу. Последние могут иметь различную величину и форму. Границы соприкосновения зерен различны — от прямых до неправильных, извилистых, так же как и форма зерен — от изометричной до удлинённой. Последним объясняется морфологическое различие гранобластовых структур осадочных пород (мозаичные, зубчатые, регенерационные [75 и др.]).

Деформационные структуры относятся к структурам метаморфизованных кварцевых пород. Возникают они в условиях больших глубин в результате пластической деформации горной породы под влиянием механических напряжений и характеризуются однозначной ориентировкой вытянутых в одном направлении зерен кварца. Указанные структуры менее изучены, чем осадочные. Еще весьма мало работ, в которых непосредственно доказывается, что закономерное положение индивидов в структуре агрегата связано именно с развитием пластической деформации.

При рекристаллизации пластически деформированного материала (первичная рекристаллизация) или при росте зерен в твердом агрегате (собирательная, вторичная рекристаллизация) возникают рекристаллизационные гранобластовые структуры — агрегат более или менее изометричных, обычно равновеликих зерен. Единого мнения о причинах возникновения и особенностях развития данного явления не существует [15 и др.].

Используя весьма общее представление о потенциальной приспособляемости агрегата к достаточно стабильным условиям изменяющейся среды, можно сопоставить между собой отдельные этапы изменения структурных признаков породы. Может быть составлена определенная хронологическая классификация, в которой следы различных "частных" процессов прошлого (структура) позволяют воссоздать общую картину структурообразования агрегата, в данном случае — картину изменения структурных признаков кварцевой породы в осадочном и метаморфическом циклах ее развития.

Несмотря на кажущуюся самоочевидность, представление о том, что структурообразование — форма существования кварцевой породы в изменяющихся геологических условиях, природа явления остается неясной, хотя мы знаем и причину явления и его следствие.

Сказанное подтверждается и анализом существующего материала по структурам кварцевых пород, показавшим следующее.

1. Кварцевые породы — рыхлые пески, плотные песчаники, монолитные кварцитовидные песчаники — могут рассматриваться как агрегат зерен обломочного кварца, различным образом приспособившийся к меняющимся условиям среды (метаморфизм погружения).

2. В кристаллической породе не существует неизменных структур, также как и структур обособленных: все структуры кварцевых пород генетически связаны между собой.

3. Структурообразование породы на различных этапах ее развития осуществляется в результате различных "частных" процессов — упругой деформации, растворения неустойчивых индивидов и регенерации более устойчивых, пластической деформации, а также рекристаллизации.

4. Существующие представления о природе указанных "частных" процессов структурообразования не идут дальше рабочих гипотез. Используемые построения в основном основаны на "изотропном приближении", которое дает лишь общие представления об указанных явлениях или тенденциях их развития. При "изотропном подходе" материалу, обладающему анизотропной кристаллической структурой, приписываются свойства аморфного тела, что, по мнению автора, недостаточно для ясного понимания существа структурообразования кристаллического агрегата.

Анализ результатов предшествующих исследований показывает, что возможное решение проблемы структурообразования кварцевой породы по сути дела состоит из решения ряда частных задач, не объединенных общей идеей. Несмотря на применение основных для геологии общих регулятивных принципов (историзм, генетизм, структурализм), степень познания геологической сущности структурообразования агрегата явно недостаточна для объяснения причин установленного единого хода развития процесса. Существующие представления о сложности рассматриваемого явления и неоднозначности природы "частных" процессов, его определяющих, также достаточно отчетливо указывают на теоретическую недоработанность проблемы структурообразования. Причины этого — в фрагментарности проведенных исследований, предубежденности о существенной пассивности геологических тел в изменяющихся условиях среды, а также в отсутствии четких представлений о путях исторических реконструкций. Недостаточность теоретико-познавательных оснований в области изучения структурообразования неизбежно порождает бесконтрольные спекуляции (например, в микроструктурном анализе).

Отсутствие системы обоснованных представлений о сущности геологического структурообразования обусловлено, вероятно, и господствующим в естествознании причинным типом научного мышления. Основываясь на "прямой" связи причины и следствия при познании структурообразования агрегата, исследователи неизбежно упускают из виду среднее звено рассматриваемого явления — сам процесс становления следствия и условия, в которых он реализуется.

Нетрудно видеть, что решение, казалось бы, чисто практической проблемы структурообразования кристаллического агрегата требует решения значительного круга теоретических и методологических проблем, в ряде случаев — на философском уровне. Последнее не удивительно: понятие структурообразование, отражающее одно из фундаментальных свойств

материи, является весьма общим и используется во всех областях научного исследования.

Пути возможного решения проблемы структурообразования автор и пытается раскрыть в предлагаемой книге. Область исследования ограничивается уточнением геологической сущности структурообразования на примере существенно кварцевых пород, выявлением специфических для структурообразования факторов и принципов, помогающих более глубокому прочтению истории объекта по существующим следам прошлого.

Уточнение геологической сущности структурообразования кварцевой породы в условиях увеличивающегося (изменяющегося) воздействия среды или в общем виде — функционирования материальной системы, сложенной упруго-анизотропными элементами с неметаллическим (ионно-ковалентным) типом связей — требует проведения дополнительных исследований причин, условий, процессов и механизмов, объясняющих структурообразование агрегата. При таком подходе уточнение геологической сущности явления практически выливается в рассмотрение физического аспекта структурообразования с выявлением физического смысла каждого процесса, ответственного за изменение структурных признаков на отдельных этапах развития породы.

Естественно, что проведение теоретического исследования научного и философского аспектов проблемы структурообразования должно опираться на существующую методологию фундаментальных естественно-научных исследований. Под методологией в данном случае понимается внутренняя организация и регулирование процесса познания, поскольку она "проецирует на специальную дисциплину общие философские, точнее теоретико-познавательные, или гносеологические, принципы" [69].

При расшифровке сущности структурообразования применяется единый методологический подход, позволяющий рационально выбирать комплекс методик, обеспечивающих целенаправленное изучение физической природы "частных" объектов, и в дальнейшем, на основании принятых регулятивных принципов, проводить разработку основ теории структурообразования.

С учетом результатов, достигнутых в области исследования функционирующих систем материального мира, из богатого арсенала существующих принципов были выбраны принципы, касающиеся способа исследования, описывающие исследовательскую, познавательную процедуру, а также подчеркивающие общие свойства подлежащих исследованию объектов. Поскольку подобный подход к решению проблемы структурообразования геологических объектов, по-видимому, осуществляется впервые, рассмотрим суть применяемых принципов несколько подробнее.

П р и н ц и п с и с т е м н о с т и: теоретическое осмысление действительности, творческое применение и конкретизация материалистической диалектики к изучаемому объекту. Выбор принципа диктуется объектом исследования — структурообразование кристаллического агрегата. Недостаточная разработанность как общей теории систем, так и частных системных теорий [95, 98], сложность распространения указанных методов на геологические объекты, недостаточность данных о свойствах систем геологических объектов [54 и др.] вынуждают ограничиваться в предлагаемой работе лишь общими принципами системности, предписывающими рас-

смагивать любой объект как систему либо как взаимодействие элементов системы. В данной работе применение принципа системности рассматривается как требование выявления и описания соотношений целого и частей в изучаемом объекте.

Принцип элементарности. Принцип указывает определенный порядок изучения. В самом общем виде принцип элементарности опирается на утверждение, что предмет иерархизирован и его познание идет от элементарного к выявлению структуры совокупности элементов (в рамках ограниченной системы ее элемент рассматривается как далее неделимый). Иерархизованность — организованная форма существования материи. Реальность этого философского представления подтверждается всем ходом геологических исследований. Иерархия геологических объектов — установленный факт [61 и др.], признающийся в настоящее время все большим числом исследователей, дискуссионность существующих схем иерархии — отражение развития данной области знаний.

В предлагаемой работе автор придерживается представления о том, что в геологическом мире существуют пять рангов иерархии, каждому из которых соответствует свой класс естественных геологических тел: минеральные, горнопородные, геотформационные, геоконплексные и геосферные [54]. Минералы и горные породы — объекты низких ступеней в интересующей нас иерархии. Минерал рассматривается как наипростейший, обладающий кристаллическим строением элемент минеральной массы земной коры. Горная порода соответствует более высокому, чем минералы, уровню организации вещества.

Применительно к задачам работы принцип элементарности требует: а) при рассмотрении явления структурообразования изучать изменения, происходящие на двух уровнях — на уровне минерального зерна (формоизменение) и на уровне породы (структурные изменения); б) учитывать, что минеральные и горнопородные геологические тела, как и вообще все ранговые тела геологических уровней организации вещества, генетически связаны между собой; в) принимать во внимание, что процессы, происходящие в геологических объектах низших ступеней иерархии, предопределяются процессами, происходящими в объектах более высоких рангов иерархии (и наоборот).

Принцип актуализма — принцип познания геологического прошлого. При реконструкции явлений прошлого с целью уточнения их физической сущности автор придерживается принципа актуализма в следующем понимании: в настоящем и прошлом есть нечто общее, на основе которого и восстанавливается прошлое. Применение в этом аспекте принципа актуализма позволяет проводить сопоставление результатов экспериментов с результатами изучения природных объектов и последних между собой. Следуя методу униформизма, при сопоставлении указанных результатов мы полагаем, что происходившие и происходящие в земной коре геологические процессы, как и наблюдаемые в эксперименте, контролируются одними и теми же законами физики и химии.

Нетрудно видеть, что автор придерживается традиционного для геологии понимания принципа актуализма. Вместе с тем С.В. Мейен [69] показал, что принцип актуализма при ближайшем рассмотрении представляет собой совокупность более фундаментальных операций — топологических

экстраполяций и процессуальных реконструкций, которые также используются автором при реконструкции событий прошлого.

Принцип топологических экстраполяций. Смысл его сводится к тому, что суждение об объекте выводится на основе изучения выборочных частей объекта.

Принцип процессуальных реконструкций также является частным случаем исторической реконструкции и предполагает реконструкцию завершившегося процесса по следам его отдельных этапов ("кинематографический" принцип Бергсона).

Принцип редукции. [68] — основа научного исследования. В данной работе под принципом редукции понимаются: а) процесс сведения сложного и непонятного к более простому и понятному; б) возможность описания геологических явлений на уровнях организации материи, подчиняющихся законам физики, химии и механики. Применительно к данной работе возможности редукции геологии к физике ограничены. Нет смысла безоговорочно принимать за постулаты существующие в ряде интересующих нас областей физики установленные вероятностные закономерности, поскольку в таком случае происходит лишь подмена незнания геологического уровня незнанием на уровне физическом. Вот почему редукция к физике в рассматриваемом случае возможна лишь в самой общей форме, т.е. редукция к самым общим апробированным временем законам и закономерностям.

Принцип структурной причинности вводится автором для объяснения сущности структурообразования материальной системы в дополнение к существующему принципу причинности. Необходимость "дополнения" заключается в том, что существующее причинное объяснение (явление понятно и объяснено, если найдена его причина) отражает лишь эмпирический уровень познания. Вводимый автором принцип представляет собой дальнейшее развитие принципа причинности. Его смысл сводится к следующему утверждению: причина и следствие связаны между собой через процесс, посредством которого конкретная причина в конкретных условиях в данном объекте вызывает конкретное следствие. Изучение процесса позволяет не только связать между собой причину, внешние условия и следствие, но и помогает ответить на самый коварный вопрос в геологии: в чем сущность явления?

Поскольку в данном случае следствие — это изменение структурных признаков агрегата, принцип может быть назван принципом структурной причинности. Доказательство целесообразности применения принципа "структурной причинности" входит в круг рассматриваемых в работе проблем.

Принцип Ле-Шателье предопределяет функционирование (поведение) геологического объекта в изменяющихся внешних условиях. Плодотворная роль этого принципа давно оценена ведущими исследователями, и не случайно А.А. Богданов использовал его в обобщенной форме при создании "всеобщей организации науки" — тектологии [9].

В нашей работе мы не придерживаемся обобщенного принципа Ле-Шателье, предложенного Е.С. Федоровым (закон адаптации): "Всякая система подвижного равновесия стремится измениться таким образом, чтобы свести к минимуму эффект внешнего воздействия" [9], поскольку такая

формулировка предполагает весьма гипотетический механизм отбора структурных признаков, не объясняет причин единой целенаправленной картины развития структурных признаков породы. Представляется, что при изучении структурообразования более целесообразно придерживаться полной формулировки рассматриваемого принципа: если равновесная система подвергается воздействию, изменяющему какое-либо из условий равновесия, то в ней возникают процессы, направленные так, чтобы противодействовать этому воздействию [9]. Согласно современным представлениям, все действие принципа сводится к установлению равновесного состояния системы в новых, изменившихся условиях, хотя в самой формулировке принципа Ле-Шателье и не фигурирует понятие "равновесие". Применительно к задачам данной работы принцип Ле-Шателье понимается как требование уделять основное внимание изучению особенностей реакции контактирующих минеральных зерен породы на изменение параметров среды и внешнего воздействия с целью уточнения природы процессов, "противодействующих" изменению воздействия.

Принцип минимума свободной энергии предопределяет движущую силу явления. Он указывает, что в изменяющихся внешних условиях развитие любого процесса материального мира — переход любой системы из одного состояния в другое — обусловлен достижением минимальной свободной энергии для данных внешних параметров. Применительно к настоящей работе принцип указывает на необходимость выявления движущей силы всех процессов, слагающих в своей совокупности явление структурообразования.

Принцип гносеологического продолжения [79] указывает пути реконструкции прошлого. Согласно этому принципу, физическое моделирование — инструмент научного познания. Задача физического моделирования — построение модели изучаемого объекта для получения о нем дополнительной информации. Модель — система, которая с той или иной степенью сходства воспроизводит другую систему (оригинал). Цель эксперимента — уточнение существующих представлений, получение новых данных о формировании и изменении структурных признаков кварцевой породы в "частных" процессах структурообразования с выявлением их природы и генетической связи между отдельными этапами структурообразования в условиях увеличивающегося воздействия среды.

Эксперименты по получению искусственных пород — песка, песчаника и кварцитовидного песчаника — проводились с учетом существующих представлений о реальных геологических условиях. Опыты проводились на природном материале (кварцевый песок), что снимало проблему эмерджентности свойств модели и прототипа. При одинаковой размерности зерен агрегатов модели и прототипа отпадает проблема разномасштабности. Проблема различия времени модели и прототипа в данных физических опытах не имела значения [54]. В целом результаты экспериментов, выполненных с соблюдением приведенных выше условий, практически адекватны реальным.

Полученные результаты эксперимента сопоставлялись с данными полевых исследований. Подтверждение результатов полевых наблюдений данными эксперимента, собственно перенос результатов эксперимента на прототип и обратно, осуществлялся методом аналогии (казуальная аналогия).

Принцип "экономии мышления" определяет объем исследования. В предлагаемой работе под данным принципом понимается утверждение, что нецелесообразно проводить исследование посредством большего, если оно может быть выполнено посредством меньшего. Выражение этого принципа в работе сводится к выявлению только самых общих закономерностей, позволяющих объяснить природу структурообразования агрегата, — неизбежный результат попытки решения столь крупной проблемы одним исследователем. Согласно этому принципу, при выполнении работы выбирался минимально необходимый объем материала, позволяющий уточнить природу лишь рассмотренных выше четырех типов структур кварцевых пород.

Рассматривая совокупность основных примененных принципов, касающихся способа исследования, отметим, что это — сложные познавательные вероятностные принципы, покоящиеся на сильных допущениях. Они выходят далеко за пределы структурообразования минерального агрегата и не являются "чисто" структурными. Изолированное использование указанных принципов малоэффективно. Они взаимосвязаны и только в своей совокупности указывают самый короткий путь наиболее достоверного решения.

Ниже рассмотрены используемые в работе основные термины и соответствующие им понятия.

Система — множество элементов, связанных прямыми и косвенными отношениями друг с другом, придающими системе автономность относительно окружающей среды.

Элемент системы — составная часть системы, обладающая целостностью и неделимостью.

Структура — пространственное размещение элементов системы, предопределяемое внешними условиями и внутренним состоянием элементов, отражение конкретных механизмов адаптации горной породы к конкретным геологическим условиям.

Функционирование (поведение, структурообразование) системы — изменение структурных признаков породы (агрегата) в условиях варьирования параметров среды и внешнего воздействия, изменение состояний системы; смена, изменение процессов и механизмов, посредством которых породы адаптируются, приспосабливаются к изменяющимся условиям среды.

Вмещающая среда — окружение системы, объекты более высокого ранга иерархии и ранга самой системы.

Геологический объект — некоторое специфическое материальное образование, существующее независимо от познающего природу субъекта и являющееся предметом познания.

Горная порода (природный минеральный агрегат) — естественная материальная система с задаваемыми природой свойствами, существующая в пространственно-временных границах, определяемых природой [54]. Элемент данной системы — отдельное упруго-анизотропное минеральное зерно (индивид).

Обращаясь к проблеме структурообразования, необходимо особо отметить, что ее содержательная сторона не может быть выведена дедуктивно из аксиом и постулатов. Успешное решение проблемы предопределяется

эмпирическим материалом, необходимым для индуктивного (от частного к общему) построения основ теории структурообразования.

Принятая система методологических принципов и основных понятий традиционно положена в основу выбора комплекса современных методов исследования. Исходя из представлений о том, что в геометрических параметрах породы и в пространственной ориентировке слагающих ее индивидов отражена двудейная сущность природы структурообразования, автором проводилось изучение как пространственного строения агрегата (стереометрические оценочные параметры), так и пространственной ориентировки зерен кварца агрегата (микроструктурный анализ, рентгенометрический метод — "обратные" полюсные фигуры). Более глубокому изучению структурных особенностей породы способствовали и разработанные автором методики "структурных карт" и "угловых соотношений". Весь комплекс методов исследования подробно рассматривается в следующем разделе.

При исследовании физического аспекта структурообразования агрегата были приняты упрощающие допущения: не учитывались роль межзеренных флюидов, природа границ зерен, геологическое время (длительность событий) явления, схематично оценивались параметры внешнего воздействия, не рассматривалась пластическая деформация в области высоких температур, где межзеренное скольжение, согласно существующим представлениям, начинает играть заметную роль, а также поведение горных пород в магматическом очаге — это темы самостоятельных исследований. Также подробно не рассматривались полиморфные превращения и минеральные преобразования.

Поскольку в эмпирических закономерностях весьма трудно уловить сущность природного явления, были построены физические модели "частных" процессов, в которых вопросы структурообразования решались с позиции анизотропии упругих свойств монокристалльного кварца; суть явлений устанавливалась на основе предложенного автором принципа структурной причинности.

Установленное сходство и подобие всех моделей "частных" процессов структурообразования кварцевых пород позволило выявить общие законы (закон — утверждение об основных свойствах объекта), характеризующие поведение упруго-анизотропного индивида в агрегате и агрегата анизотропных индивидов в изменяющейся среде. Полученные данные рассматриваются автором в качестве логической основы общей теории структурообразования разномасштабных геологических объектов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Примененный в работе комплекс современных методов исследования позволяет получать необходимые данные об изменении структурных признаков породы на основе изучения двух дополняющих друг друга характеристик: пространственного строения породы и пространственной ориентировки слагающих ее зерен. Изучение ориентированного строения рыхлых пород проводилось на образцах, сцементированных карбинольным клеем, обладающим высокой диэлектрической проницаемостью [110].

Особенности изучения пространственного строения структур кварцевых пород. Оценка морфологических особенностей структур проводится на основе выбранных геометрических параметров. Корни метода количественной оценки того или иного параметра структуры восходят к началу становления петрографии как науки и связаны с методами определения минерального состава горных пород в шлифе: М. Делесс в 1847 г. использовал планиметрический метод, А. Розиваль в 1898 г. развил линейный метод, А.А. Глаголев в 1941 г. предложил наиболее удобный точечный метод [19, 103 и др.]. Перенесение этих методов в металлографическую практику и их последующее развитие привело к созданию системы методов [83, 103], позволяющих получить представление о пространственном строении металлов и сплавов на основании изучения геометрических параметров плоскостной структуры (стереометрическая металлография). Использование этих методов для изучения широкого круга материалов и объектов (таких как полупроводники, керамика, живые и растительные ткани и пр.) в конечном итоге привело к созданию стереологии — науки о пространственной структуре, методах ее реконструкции и количественной оценки на основе конкретных геометрических параметров, получаемых с помощью простых измерений двухмерных структур, наблюдаемых в шлифах, аншлифах, штуфах, фотографиях и пр.

Стереологическая реконструкция пространственного строения агрегата состоит в том, что простые измерения выбранных геометрических параметров структуры (размер зерен, кривизна их границ, форма плоских сечений и пр.), проведенные на плоскости наблюдения, с помощью специальных формул, выведенных на основании законов геометрической вероятности и дифференциальной геометрии, преобразуются в качественные характеристики пространственной структуры [103 и др.].

Привлечение идей стереологии к изучению структурных особенностей минеральных агрегатов [51, 52, 149] — весьма перспективное начинание, поскольку в первую очередь позволяет заменить существующее качественное описание морфологических признаков принципиально новым — полу-

количественным и проводить объективное сопоставление изучаемых структур между собой.

Оценку морфологических признаков песчаной породы можно получить, изучая помимо однородности размеров кривизну (степень уплощенности) границ зерен, число сторон в сечениях индивидов агрегата и особенности распределения величин двугранных углов в местах стыка трех соседних зерен. Все измерения проводятся на больших фотографиях плоских срезов изучаемых агрегатов (прозрачные шлифы, аншлифы, фиг. 1).

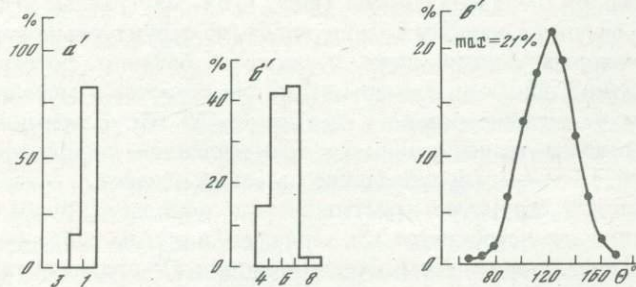
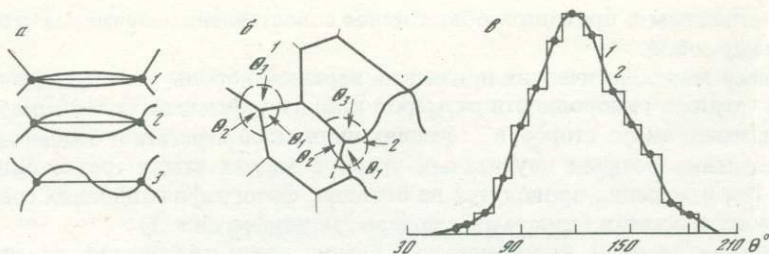
Кривизна (степень уплощенности) границ зерен оценивалась в данной работе на основе трехбалльной шкалы (фиг. 1, а). Двугранные углы (б) измерялись на рисунках каркаса границ зерен (по структурным картам), подробнее о которых сказано ниже, а также на больших фотографиях изучаемых участков шлифов; размеры зерен для точности измерений соответствующим увеличением доводились до 15–20 мм. Измерение проводилось прозрачным транспортиром с прикрепленной прозрачной подвижной планкой, облегчающей проведение массовых замеров.

В гранобластовой структуре кристаллической породы в общем случае вдоль ребра индивида встречаются три зерна, т.е. в общем ребре сходятся три стороны, принадлежащие трем соседним зернам. По правилу векторного разложения межзеренного натяжения в однофазном агрегате, обладающем равновесной гранобластовой структурой, углы между сторонами контактирующих зерен должны приближаться к 120° [156 и др.], т.е. $120 + 120 + 120 = 360^\circ$. При пересечении плоскостью препарата такого сечения трех зерен по ребру получаем точку, в которой сходятся три границы. Эта "тройная точка" и есть центры измерения двугранных (дигедральных) углов.

Транспортиром измеряют два угла (Θ_1 и Θ_2), а третий угол получают вычитанием $\Theta_3 = 360^\circ - (\Theta_1 + \Theta_2)$ (б). Полученные в результате измерений данные обрабатывают статистически — строят гистограммы (все на основании 100–150 замеров). Для двугранных углов удобнее пользоваться кривой, построенной на основе полученной гистограммы (более наглядно отражаются основные тенденции формирования структуры).

Гистограмма двугранных углов равновесной гранобластовой структуры или кривая распределения двугранных углов (в) будет иметь максимум при 120° . Полагают [83, 103 и др.], что наиболее важная информация при изучении гранобластовых структур содержится не столько в максимальном значении гистограммы при 120° , сколько в степени неоднородности величин углов, которые характеризуются величиной дисперсии, или средним квадратичным отклонением. Однако в настоящей работе представления о дисперсии углов не используются, поскольку в основе исследования лежит не столько уточнение степени равновесности гранобластовых структур, сколько сопоставление структурных признаков пород, связанных с различными процессами; применение двугранных углов для характеристики деформационных структур горных пород проводится впервые [43].

Немаловажное значение имеет и форма минеральных зерен кварцевой породы в изучаемых плоских сечениях: гистограммы частот встречаемости срезов зерен с разным числом сторон служат показателем степени приближения структуры (гранобластовой) к равновесию. В зерне, соответствующем форме модели равновесного зерна (кубооктаэдр Кельвина, тетра-



Ф и г. 1. Геометрические характеристики, используемые для оценки структуры породы

а — шкала степени увеличения (1–2–3) совершенства (уплощенности) границ зерен: 1 — практически ровные, 2 — слабо искривленные, 3 — интенсивно искривленные; *б* — двугранные углы θ_1 , θ_2 , θ_3 в тройной точке плоского сечения агрегата: 1 — порядок замеров при ровных границах зерен; 2 — то же, при искривлениях; *в* — гистограмма распределения двугранных углов (1); кривая распределения двугранных углов (2); *а'*–*в'* — общая характеристика пространственного строения мозаичной гранобластовой структуры кварцитовидного песчаника: *а'* — гистограмма, отображающая степень кривизны границ зерен; *б'* — гистограмма, характеризующая форму сечений зерен в шлифе; *в'* — кривая распределения двугранных углов

каиздрон Вильямса, ячейка Коксетера), в сечении преобладают пяти-, шести- и семиугольники. Сопоставляя полученные результаты с теоретической моделью, можно получить еще одну полуколичественную оценку изучаемых гранобластовых структур.

В предлагаемой работе форма зерен используется в основном для сопоставления и характеристики различающихся между собой гранобластовых и деформационных структур. Пример оценки морфологических признаков гранобластовой структуры песчаной литифицированной породы с помощью стереологических методов приведен на фиг. 1, *а–в*.

Помимо указанных в работе методик используются также методики [84 и др.], позволяющие: а) определять объемную долю одной из фаз в двухфазном агрегате и б) оценить суммарную площадь поверхности индивидов одной из фаз двухфазного агрегата в единице объема (удельная поверхность, $\text{мм}^2/\text{мм}^3$), а также сопоставлять суммарные площади поверхностей индивидов в единице объема при различной крупности зерна.

Особенности изучения пространственной ориентировки структур кварцевых пород. Основными методами исследования пространственной ориентировки индивидов породы были применявшийся более широко метод микроструктурного анализа и метод рентгеновской дифрактометрии.

Метод микроструктурного анализа [50, 66, 78, 153, 161] заключается в следующем: замеряется положение выбранного для исследования кристаллографического или кристаллооптического направления во многих зернах какого-либо минерала, слагающего горную породу, и после соответствующей статистической обработки ориентировка замеренного элемента предстает в форме круговой диаграммы, по узору которой и судят о наличии или отсутствии ориентировки изучаемых зерен в породе. Узоры микроструктурных диаграмм оптической ориентировки индивидов — геометрическое выражение внутреннего строения породы.

Этот метод, начиная с 1911 г., когда была опубликована первая работа Б. Зандера, прочно вошел в арсенал геологических методов исследования (в основном природных пластически деформированных пород) и во многом содействовал расширению наших знаний о внутреннем строении горных пород. К сожалению, микроструктурный метод использовался для уточнения тех процессов структурообразования (пластическая деформация, раскristализация), природа которых другими методами еще не была уточнена. Это в конечном итоге привело к тому, что точный смысл многих построений петротектоники оставался недостаточно ясным [89]. Несмотря на изложенное выше, микроструктурный метод исследования ориентированного строения горных пород был и остается надежным методом выявления степени упорядоченности в пространстве кристаллических структур минеральных зерен породы (для кварцевых пород — на основе изучения оптической ориентировки зерен агрегата).

При проведении данной работы помимо обычной стандартной методики микроструктурного анализа [66 и др.] широко применялась более сложная методика, которую можно условно назвать методикой "структурных карт". В основе этой методики лежит редко применяемый специальный анализ, названный Б. Зандером анализом "распределения осей" [153]. Этот анализ автором несколько изменен: изучение ориентировки зерен породы проводится на основе "структурных карт" — фотографий (или кальки) изучаемых участков шлифов, на зернах кварца которого нанесено положение оптических осей. Предложенная методика позволяет осуществить переход от изучения отдельных локальных участков с ограниченным числом зерен, что характерно для "структурных карточек", к наблюдению и сопоставлению особенностей пространственной ориентировки (и пространственного строения) на всей изучаемой площади шлифа.

Изучение ориентировки зерен кварца породы проводится и на всей исследуемой площади шлифа, и на отдельных ее участках. Применение усложненной методики микроструктурного анализа — методики "структурных карт" — позволило получить более полное и объективное по сравнению с ранее проводившимися исследованиями представление об особенностях развития ориентированного строения кварцевой породы в ходе ее геологического развития.

К сожалению, применение указанных методик не давало полного представления о пространственной ориентировке минералов в породе, так как для кварца методом микроструктурного анализа можно выявить только пространственную ориентировку оптических осей индивидов поликристалла.

В работе широко использован (особенно при рассмотрении структур

метаморфизованных пород) дифрактометрический метод изучения структур (метод "обратных" полюсных фигур), примененный автором совместно с Л.Н. Левушкиным [37, 39 и др.] к изучению кварцевых пород песчаных. Этим методом не выявляется оптическая ориентировка зерен, но он позволяет получить объективную картину их кристаллографической ориентировки в образце без его разрушения. Метод освобождает исследователя от выполнения кропотливой работы, неизбежной при микроструктурном анализе, и незаменим при изучении ориентированного строения горных пород, сложенных зернами размерами меньше 0,03 мм.

Сущность метода "обратных" полюсных фигур [94, 136] в рассматриваемом случае сводится к установлению для исследуемого сечения образца горной породы степени однородности ориентировки кристаллографических плоскостей минералов, слагающих данную породу. Последнее основывается на том, что рентгенограмма образца, имеющего преимущественную ориентировку кристаллических зерен, будет отличаться от рентгенограммы того же вещества, зерна которого ориентированы в пространстве хаотично, соотношением интенсивности дифракционных максимумов.

После съемки образца и соответствующей обработки дифрактограмм полученные данные наносятся на стандартную проекцию кристалла — сетку Закса. В каждой точке плоскости проекции указывается (по отношению к беспорядочному расположению индивидов) относительное число выходов нормалей к плоскостям hkl кристаллитов изучаемого образца поликристалла. Построенные точечные диаграммы обрабатываются путем проведения изолиний, оконтуривающих поля одинаковой плотности точек.

В конечном итоге ориентировка кристаллографических элементов минеральных зерен породы (в данном сечении) предстает в виде круговой диаграммы, на которой степень совершенства ориентировки того или иного кристаллографического элемента имеет вид максимумов различной плотности (это и есть "обратная" — обращенная — полюсная фигура).

Для кварца может быть рассмотрена не вся "обратная" полюсная фигура, а только треть ее (остальное находится путем симметрических преобразований). Представление о пространственной ориентировке слагающих породу минералов получается сопоставлением ориентировки кристаллографических элементов кристаллитов на трех взаимно перпендикулярных сечениях образца.

Изучение проводилось на дифрактометре УРС-50 ИМ с гониометрической приставкой ГП-4 (нефильтрованное излучение, трубка БСВ-6 с железным анодом, напряжение 35 кВ, анодный ток 10 мА, скорость съемки — градус/минута), дифракционная картина регистрировалась на ленте электронного потенциометра ЭПП-9. В качестве эталона использовался порошок исследуемого кварцевого материала.

В заключение отметим: а) специфика применяемого рентгенометрического метода в том, что им непосредственное положение оптических осей кварца установлено быть не может: отражение от (0001) для кварца запрещено; закон погасания для $D_3^2 = PZ_1 21 (0001) : 1 = 3n$ [10 и др.]; б) при изучении ориентированного строения образцов (тексту-

рированных образцов) дифрактометрическим методом необходима весьма четкая привязка их сечений к осям текстуры; в) чувствительность рентгеновского метода, используемого для снятия "обратных" полюсных фигур, позволяет улавливать только основные особенности ориентированного строения изучаемого поликристалла; однако этого вполне достаточно для решения вопросов, рассматриваемых в данной работе (компоненты текстуры, составляющие малый объем материала, требуют локальных методов исследования).

Подводя итог рассмотрения основных примененных методов исследования пространственной ориентировки минеральных зерен породы — микроструктурного и дифрактометрического, отметим, что только их совместным применением можно определить преимущественное пространственное положение индивидов в изучаемом поликристалле (пространственное положение зерен кварца в кварцевой породе).

Выявление связи между пространственным строением и пространственной ориентировкой кварцевой породы. Разработанная автором методика "угловых соотношений" направлена на уточнение связи между двумя рассмотренными выше сторонами структурообразования (пространственным строением и пространственной ориентировкой). Она основана на использовании "структурных карт". По ним измеряются углы между длинными осями зерен и положением в них оптических осей (для каждого зерна отдельно). Изучение проводится в основном в зернах, оптические оси которых лежат в плоскости шлифа либо наклонены к ней под углом не более 40° . Число зерен с наклоном оптической оси $20-40^\circ$ не превышает 25% от общего числа зерен замеренных.

Угловые соотношения измеряются в интервале от 0 до 90° ; т.е. от положения, при котором длинная ось зерна кварца параллельна оптической оси, до положения, при котором длинная ось зерна кварца ей перпендикулярна. Поскольку направление оптической оси кварца в кристалле непостоянно, сведение всех замеряемых угловых соотношений в указанный интервал правомочно. На основании полученных замеров строились гистограммы. Так как ориентировка длинных осей в зернах определяется с точностью не более $\pm 5\%$, интервал гистограмм принят равным 10° ($0-10$, $10-20$, $20-30^\circ$ и т.д.).

Если принять, что угол между простираем оптической оси и удлинением зерна можно представить в виде случайной величины, то к данному эмпирическому материалу можно подобрать множество теоретических значений распределения, более или менее удовлетворительно описывающих имеющиеся наблюдения. Для рассматриваемого случая наиболее целесообразно принять за основу гипотезу равномерного распределения [70].

Проверка возможности использования модели равномерного распределения проводилась с помощью известного критерия χ^2 . Вычислив его значение и сопоставив с табличными значениями для заданного уровня значимости, можно определить возможность использования модели равномерного распределения. Используя квадраты средневзвешенных отклонений от равномерного распределения $(v_i - v'_i)^2 / v'_i$, определяем участки наибольшего отклонения от равномерного распределения. Результаты проверки статистической гипотезы о равномерном распре-

делении использовались при обосновании представлений о причинах возникновения удлиненной формы зерен изучаемой породы.

В предлагаемой работе, проводимой на основе системного подхода к анализу причин развития структурных признаков кварцевой породы, в отдельных случаях дополнительно использовались следующие методы исследования: микроскопические, пьезоэлектрический, ультразвуковой, электронно-микроскопический, рентгенометрические, рентгенотопографические и др.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КВАРЦЕ

Кварц (SiO_2) — один из главных породообразующих минералов. Наиболее распространенная форма кварца — мелкие неправильные зерна, составляющие существенную часть осадочных пород — песков, песчаников, кварцитопесчаников, а также входящие в состав различных метаморфических пород — сланцев, гнейсов, кварцитов. Крупные скопления кварца сосредоточены в магматических породах гранитных пегматитов, в кварц-полевошпатовых жилах, в рудных и безрудных кварцевых жилах, в жилах альпийского типа (хрусталеносных жилах) и т.д.

Кварц образует две модификации: низкотемпературный тригональный α -кварц (собственно кварц), устойчивый при обычных давлениях до 573°C , и высокотемпературный, гексагональный β -кварц, устойчивый при обычных давлениях в пределах $573\text{--}867^\circ\text{C}$.

Пространственная группа β -кварца: $D_6^4 - P6_2 22$, $D_6^5 - P6_3 22$; $(L_6 6L_2)$.

Элементы симметрии α -кварца: одна вертикальная оптическая ось L_3 и три горизонтальные, расположенные под углом 120° друг к другу, двойные оси ($L_3 3L_2$). Низкотемпературный кварц, как и β -кварц, существует в двух энантиоморфных разновидностях: $D_3^4 - P3_1 21$ и $D_3^5 - P3_2 21$ — правый и левый кварц соответственно. Их распространенность в геологическом мире одинакова.

Структуры α - и β -кварца — каркасного типа.

Образующие структуру кварца тетраэдры (SiO_4) имеют почти симметричную форму. В каждом тетраэдре SiO_4 два кислородных иона располагаются несколько выше, а два других несколько ниже, чем ион кремния. Характерной особенностью структур α - и β -кварца является то, что тетраэдры сочленяются общими вершинами (т.е. атомы кислорода, расположенные в вершинах одного тетраэдра, одновременно принадлежат и соседним тетраэдрам). Тетраэдры расположены на разных уровнях по спиральям, закручивающимся направо или налево по двухходовому винту (правые и левые кварцы) вокруг шестерной (β -кварц) или тройной (α -кварц) оси. Колонки тетраэдров, связанные между собой, образуют каркас, бесконечный в трех измерениях.

В структуре кварца связь Si-O предположительно промежуточная между ионной и ковалентной.

Идеальный кристалл α -кварца образован в основном пятью габитусными формами: призма $m(10\bar{1}0)$, основной ромбоэдр $R(10\bar{1}1)$, второй ромбоэдр $r(01\bar{1}1)$, трапецоэдр $x(51\bar{6}1)$, тригональная бипирамида $s(11\bar{2}1)$

[48, 70 и др.]. Кроме того, указываются еще более 500 редких, недостаточно доказанных или сомнительных форм.

Несдвойникованные кристаллы кварца представляют большую редкость; двойники многочисленны и разнообразны. Наиболее обычны дофинеи (швейцарские) двойники: прораствание, реже сраствание одноименных по знаку индивидов, один из которых повернут вокруг оси c на 180° .

Дофинеи [70 и др.] могут быть получены искусственно: механическим воздействием, нагреванием (до $380\text{--}530^\circ\text{C}$) и быстрым охлаждением, воздействием электрического поля. Бразильские двойники, двойники Либиша, двойники по японскому закону и другие имеют подчиненное значение.

О п т и ч е с к и е с в о й с т в а. В шлифах под микроскопом кварц в проходящем свете бесцветен, оптически положительный, одноосен. Светопреломление низкотемпературного кварца: $N_e = 1,553$, $N_o = 1,544$, светопреломление кварца высокотемпературного (при 750°): $N_e = 1,543$, $N_o = 1,546$.

В природных условиях погасание часто неравномерное: волнистое, облачное, блоковое, линейно-полосчатое и пр. Аномальное угасание может быть следствием условий образования, или характера деформации; механизм возникновения аномального угасания трактуется различно [48, 70].

В деформированных образцах кварца отмечается аномальная двуосность $2v$ до 84° [32]; она может быть получена в лабораторных условиях (деформация, термическое воздействие, электрическое поле и пр.).

При нагревании α -кварца показатели преломления и двупреломления понижаются, резко уменьшаясь в точке инверсии, и в дальнейшем, при повышении температуры, увеличиваются незначительно. Переход α -кварца в β -кварц сопровождается увеличением объема на $0,86\%$. При превращении в обоих направлениях монокристаллы кварца сохраняются. Для чистого кварца α - β переход происходит при температуре $573,5^\circ\text{C}$. У 95% природного кварца температура перехода не отличается от указанной более чем на $\pm 2,5^\circ$. Перестройка решетки α -кварца начинается до температуры инверсии: при 524° атомы Si занимают уже позиции, соответствующие β -кварцу. При увеличении гидростатического давления температура инверсии возрастает и достигает 599° при 1000 бар, 704° при 5 кбар и 815° при 10 кбар [166].

Параметры ячейки кварца при нагревании возрастают, особенно резко в пределах $550\text{--}580^\circ$ [70], при воздействии давления — уменьшаются [143].

Как показали результаты наших исследований [82 и др.], в условиях опыта в области давлений $40\text{--}140$ кбар при температурах $700\text{--}2000^\circ\text{C}$ верхняя граница поля существования метастабильного кварца в зависимости от давления определяется температурами $700\text{--}1300^\circ$ (выше образуется коэзит).

Объем книги не позволяет даже фрагментарно рассмотреть физические свойства кварца; заинтересованный читатель без труда найдет необходимые сведения в многочисленных специальных работах. Но элементарные сведения для понимания физических основ структурообразования кварцевой породы следует здесь привести. Речь идет об упругих свойствах кварца,

поскольку именно они в силу их основополагающей роли в структурообразовании минерала и достаточной изученности позволяют, по мнению автора, приблизиться к пониманию природы структурообразования минеральных агрегатов.

В области малых напряжений под воздействием приложенных механических сил в кристалле возникает деформация, мгновенно исчезающая при снятии нагрузки. Такие деформации называются упругими. Они могут быть вызваны не только внешней нагрузкой, но и объемными силами, температурными градиентами и другими источниками внутренних напряжений.

Кристаллофизический механизм явления упругости в общем случае сводится к тому, что силы взаимодействия между атомами (ионами) в кристаллическом теле восстанавливают происшедшее под действием внешних сил изменение расстояния между ними [63, 88 и др.].

Рассматривая эти свойства более подробно, укажем, что в области небольших напряжений (σ) удлинение (ξ) растет линейно и для нее справедлив закон Гука (частная форма его для случая однонаправленного удлинения изотропного материала): $\delta = E(\Delta l/l)$, где E — модуль Юнга (показатель линейной деформации).

При исследовании явлений упругости анизотропного тела используются коэффициенты C_{ij} и S_{ij} .

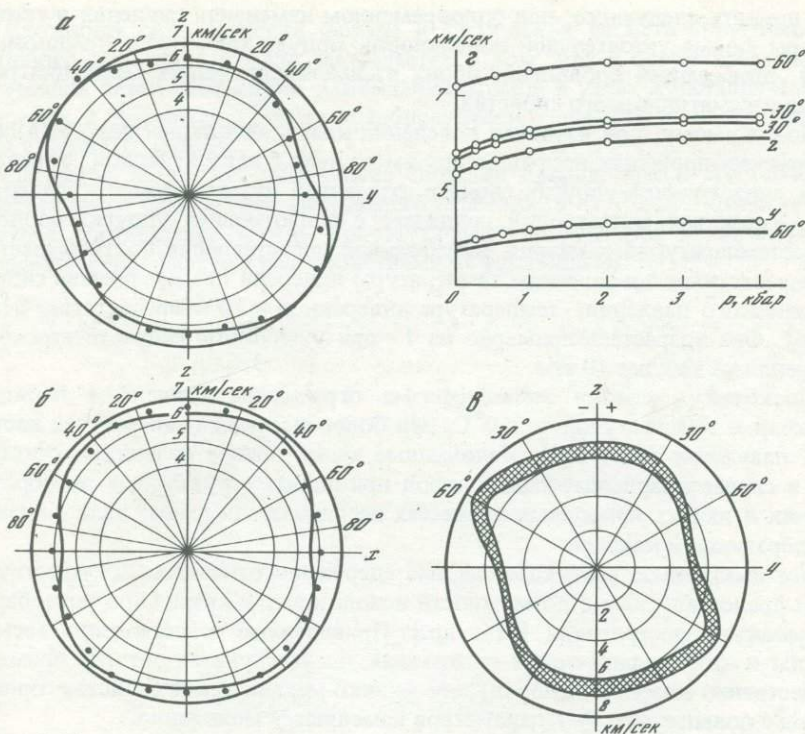
Связь между модулями упругости (C_{ij}) и модулями (коэффициентами) податливости (S_{ij}) в направлении главных осей обратная, т.е. константы S_{11} , S_{22} , S_{33} представляют собой величины, обратные модулю нормальной упругости в направлении осей x_1 , x_2 , x_3 в предположении, что деформируемое тело представляет собой тонкий стержень и все деформации в нем совершаются беспрепятственно [3 и др.].

Для качественной характеристики упругих свойств кварца в работе используются в основном не коэффициенты C_{ij} и S_{ij} , а модули Юнга вычисленные на их основе [109]. По расчетным данным были построены указательные поверхности модулей Юнга — в пространстве из одной точки откладывались значения модулей Юнга, вычисленные для различных направлений в кристалле для конкретных условий [109].

В настоящей работе для характеристики упругих свойств кварца используются сечения указательных поверхностей. Для низкотемпературного кварца: сечение, перпендикулярное оси z , — круг; сечение, нормальное оси y , — эллипс, вытянутый вдоль оси z ; сечение, нормальное оси x , имеет сложный вид, поскольку в этом сечении есть направления, характеризующиеся и минимальным, и максимальным значениями модуля Юнга. Сечений с экстремальными значениями модулей нормальной упругости у кварца три.

Сечения указательных поверхностей позволяют оценивать величину изучаемого свойства кристалла только в некоторых направлениях, поэтому в настоящее время начинают применяться стереографические проекции указательных поверхностей [88 и др.], на которых изучаемые физические свойства кристалла могут определены в любом заданном направлении.

Отсутствие данных об изменении анизотропии упругих свойств кварца в зависимости от изменения окружающего давления обусловило постановку опытов, в которых было проведено изучение акустическим методом



Ф и г. 2. Пространственное распределение скорости продольных волн (v_p) в кристалле кварца [2]

a и *б* — при атмосферном давлении [86]: *a* — сечение zy , *б* — сечение zx (точки — экспериментальные значения, линия — теоретические значения); *в* — в условиях всестороннего сжатия до 4 кбар (внешний контур; заштрихованный контур — приращение скорости в условиях всестороннего сжатия [2]); *г* — график изменения скорости v_p в зависимости от всестороннего сжатия

анизотропии упругих свойств кварца в условиях гидростатического давления до 4 кбар при нормальной температуре [2].

Результаты проведенного нами изучения распределения скорости продольных волн показали, что установленная при атмосферном давлении анизотропия скоростей V_p в сечении с экстремальными значениями модулей Юнга при всестороннем давлении до 4 кбар не только сохраняется, но и становится более четко выраженной (фиг. 2). Закономерность подтверждена более поздними исследованиями. Поскольку характер анизотропии скоростей V_p в кварце позволяет судить об анизотропии его упругих свойств, полученные данные показывают, что анизотропия упругих свойств низкотемпературного кварца в условиях всестороннего сжатия при нормальной температуре не только сохраняется, но и становится более отчетливой.

В настоящее время мы не располагаем данными об изменении упругих свойств кварца при одновременном изменении P - T условий. Вместе с тем взаимоположенные тенденции изменения упругих свойств (модуль Юнга) в зависимости от воздействия давления (возникновение более четкой анизотропии) и температуры (анизотропия нивелируется) дают основа-

ние принять следующее: при одновременном изменении давления и температуры форма указательной поверхности модуля Юнга будет компромиссной, отражающей проявление обоих взаимоисключающих тенденций развития рассматриваемого свойства.

По-видимому, при изучении поведения кварцсодержащей породы в геологических процессах исследователь имеет дело с искусственной (наведенной) анизотропией упругих свойств, созданной путем внешнего воздействия. Указанная анизотропия совпадает с анизотропией упругих свойств низкотемпературного кварца. Высказанное представление подтверждается общеизвестным повышением температуры инверсии при увеличении гидростатического давления; температура инверсии при 10 кбар достигает 815° [166]. Она возрастает примерно на 1° при увеличении гидростатического давления на каждые 40 атм.

Поскольку условия метаморфизма ограничены давлением порядка 15 кбар и температурой $\sim 750^{\circ}\text{C}$, при более высоких температурах наступает плавление [96 и др.]. Изложенные выше данные позволяют считать, что в случае кварцсодержащих пород при любых структурных преобразованиях в любых природных процессах исследователи имеют дело с низкотемпературным кварцем.

Все изложенное вынуждает весьма сдержанно относиться к существующим представлениям о возможности использования кварца при термобарометрических построениях [91 и др.]. Приведенные представления весьма важны и для геофизических построений, так как указывают (на примере существенно кварцевых пород), что физико-механические свойства горных пород с повышением P - T параметров изменяются монотонно.

В заключение целесообразно указать на особенности связи морфологии кварца с его кристаллической структурой и физическими свойствами, поскольку в геологической литературе (особенно в области микроструктурных исследований) указанные взаимоотношения трактуются излишне упрощенно.

Исходя из ретикулярных плотностей сеток (закон Браве), обычно не удается однозначно показать связь внешней огранки кристалла кварца с формой и размером его элементарной ячейки. Попытки увязать наблюдаемую внешнюю форму с пространственными группами симметрии (учет винтовых осей и плоскостей скользящих отражений) лишь несколько улучшили это соотношение, но однозначность соответствия между морфологией кристалла и его кристаллической структурой все равно установлена не была [48 и др.].

Известно, что симметрия физических свойств кристалла может отличаться от симметрии его кристаллической структуры, хотя группа симметрии каждого физического свойства включает в себя элементы точечной симметрии кристалла — принцип Неймана [104 и др.]. Для кварца различия симметрии свойств и симметрии структуры существенны; например: симметрия низкотемпературного кварца 32 , а симметрия его оптической индикатрисы $\infty/m \cdot t$; симметрия указательной поверхности модуля Юнга низкотемпературного кварца выше симметрии структуры кварца, так как она центросимметрична; симметрия указательных поверхностей коэффициентов растяжения и кручения кварца $\bar{3}l$, т.е. выше группы симметрии кристалла (32), и т.д.

Сложность сопоставления формы и физических свойств упруго-анизотропного кристалла кварца заключается в том, что в основе симметрии кристалла лежит симметрия размещения атомов в узлах кристаллической решетки, а симметрия свойств предопределяется симметрией взаимодействия указанных атомов.

Несмотря на то, что физические свойства кварца, как и его габитус, определяются симметрией внутреннего строения, в настоящее время однозначное соответствие между кристаллической структурой минерала, его морфологией и физическими свойствами не установлено.

Часть первая

СТРУКТУРЫ РЫХЛЫХ КВАРЦЕВЫХ ПОРОД И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИХ ИЗМЕНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭПИГЕНЕЗА

Отсутствие данных о процессах, предопределяющих появление и дальнейшее развитие осадочной породы как системы множества взаимодействующих элементов, вынуждает весьма подробно рассмотреть основные аспекты этой глобальной проблемы.

При выборе основных направлений исследования учитывались общераспространенные представления о том, что формирование осадочной песчаной породы начинается в условиях выветривания. Под влиянием физико-химических агентов выветривания из кварцсодержащих изверженных, метаморфических или плотных осадочных пород происходит высвобождение кварцевого материала, формируется обломочный кварц — главный породообразующий минерал песчаных пород. В результате физической транспортировки (водным или воздушным путем) обломочный кварц поступает в бассейны седиментации: формируются толщи песков — агрегаты рыхлого высокопористого нецементированного материала с величиной зерен от 0,06 до 2 мм, обладающие способностью к самонакоплению и наземной или подводной миграции [74]. При последующем захоронении исходный рыхлый песок претерпевает необратимые изменения, превращаясь в конечном итоге в плотный, практически лишенный пористости песчаник.

В данной части работы рассматриваются формирование главнейшего типоморфного признака обломочного кварца — его удлиненной формы, становление рыхлой песчаной породы в условиях седиментации и изменение структурных признаков осадочной породы при литификации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Существующие представления об ориентировке зерен кварца в осадочных породах

Изучение ориентированного строения осадочной породы в общем случае можно свести к изучению ориентировки: а) длинных осей зерен кварца (ориентировка зерен по удлинению), б) их оптических осей (ориентировка оптическая), в) кристаллографических элементов зерен (ориентировка по "внутреннему строению"), а также к комплексному изучению ориентировки зерен по удлинению, оптической и по "внутреннему строению".

Возникновение ориентированного строения кварцевой осадочной недеформированной породы по удлинению зерен в настоящее время объясняется тем, что ориентировка зерен (песчинок) происходит в результате взаи-

модействия формы зерен, поверхности напластования и внешнего ориентирующего фактора (ветра, воды), под влиянием которого частицы перемещаются в поле гравитации. При этом предполагается [66 и др.], что зерна кварца в той или иной мере удлинены и ложатся параллельно поверхности напластования. В зависимости от интенсивности внешнего ориентирующего фактора (направления водного потока, ветра) длинные оси зерен могут располагаться либо параллельно, либо перпендикулярно к направлению их перемещения.

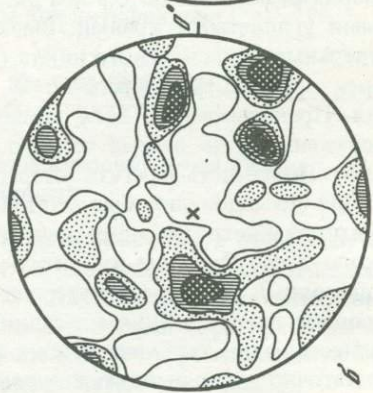
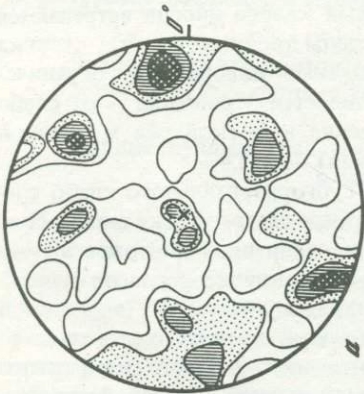
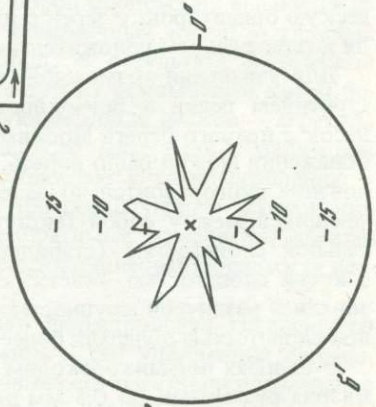
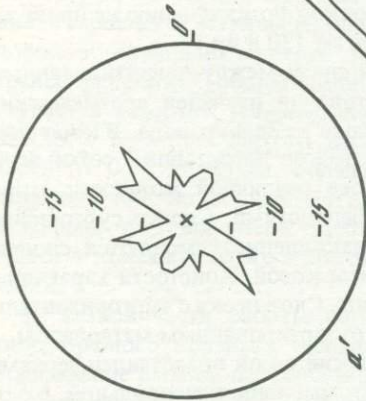
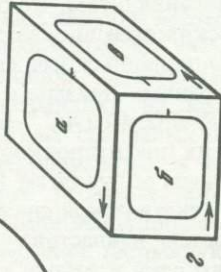
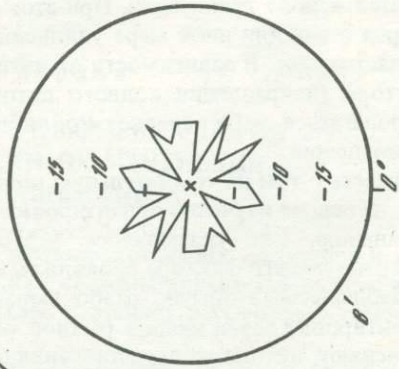
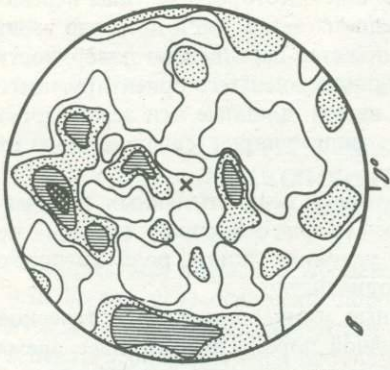
Вместе с тем на сомнительную геологическую ценность данных, полученных на основе изучения ориентировки зерен кварца осадочной породы по удлинению, уже указывалось [62]; в условиях опыта роль внешнего ориентирующего фактора проявлялась неоднозначно.

Наблюдаемые обычно слабо выраженные узоры диаграмм оптической ориентировки зерен кварца рыхлой осадочной породы в настоящее время объясняют, исходя из представления о том, что ориентировка длинных осей зерен относительно их оптических осей вполне определена, так как "оптические оси кварца, относительно длинных осей его осколков, образованных трещинами, параллельными гранями призмы и ромбоэдров, будут располагаться под углами, близкими к 0, 40 и 45°" [66]. Попытки связать оптическую ориентировку зерен с их ориентировкой по удлинению не приводили к однозначным положительным результатам [20 и др.]

Для уточнения возможной генетической связи между ориентированным строением песка и поверхностью напластования изучался верхнеюрский песок с правого берега Москвы-реки в районе г. Звенигорода. В коренном обнажении можно было видеть, что толща песков представляет собой чередование субгоризонтально залегающих слоев различной мощности, отличающихся между собой текстурными особенностями. Слои с субгоризонтальной слоистостью (стабильное осадконакопление) сменяются слоями с косой слоистостью. Участки с проявлением косой слоистости характеризовались различной крупностью зерен кварца. Слои песка с субгоризонтальной слоистостью обладали более или менее отсортированным материалом.

В шлифах под микроскопом звенигородский песок представлен зернами кварца размерами до 0,5 мм различной формы, чаще неправильной, с острыми угловатыми краями. Вместе с зернами кварца иногда встречаются отдельные зерна полевого шпата (несущие следы двойникования); огранка зерен кварца: рациональные и иррациональные поверхности ограничения. Практически во всех зернах устанавливается удлинение — от слабо выраженного до весьма четкого (соотношение короткой оси к длинной 1 : 4). Пористость агрегата (стереометрическая) $48 \pm 2,4\%$.

Для исследования был взят образец из субгоризонтального слабо сцементированного окислами железа слоя отсортированного песка мощностью около 2 см. Причины для этого следующие: отсортированный достаточно однородный по разрезу материал указывал на спокойное, согласно существующим представлениям, осадконакопление. Наличие четких плоскостей напластования, ограничивающих рассматриваемый пропласток, позволяло достаточно полно выявить влияние этого, считающегося основным, фактора на ориентированное строение рассматриваемой рыхлой осадочной породы. Слабо сцементированный окислами железа песок (легко растирающийся между пальцами) позволил достаточно просто (после просушки) цементи-



ровать рыхлую породу карбинольным клеем, не опасаясь нарушения исходной первичной структуры песка.

Изучение ориентированного строения рассматриваемого материала проводилось следующим образом.

В отличие от более ранних исследований [20, 141, 163] ориентировка зерен кварца по удлинению изучалась в шлифах на тех же самых зернах, для которых устанавливалась и ориентировка оптическая. Результаты изучения приведены на фиг. 3. Из диаграмм видно, что ориентировка зерен песка по удлинению на различных сечениях несколько различна, интенсивность ее проявления недостаточно высока (не более 10%).

Ориентируясь на преобладающее удлинение зерен (в пределах 5–10%), можно заметить отсутствие предпочтительной ориентировки как на горизонтальном, так, что самое главное, и на вертикальных сечениях. Сопоставляя ориентировку зерен кварца по удлинению на трех взаимно перпендикулярных сечениях, отметим и компактную упаковку зерен (типа плотной упаковки), и отсутствие влияния плоскости напластования на ориентировку зерен по удлинению.

Оптическая ориентировка агрегата зерен кварца природного песка на узорах диаграмм всех трех взаимно перпендикулярных сечений типична для кварцевых осадочных пород. В пространстве узору диаграмм изученных сечений ориентированы различно, что не позволяет сопоставлять их между собой.

Сопоставление узоров диаграмм оптической ориентировки и ориентировки зерен по удлинению показывает, что непосредственной связи между указанными типами ориентировки нет; ориентировка оптических осей зерен кварца не коррелируется с ориентировкой тех же зерен по удлинению. Это ставит под сомнение правомочность распространенного представления о том, что ориентированное строение рыхлого агрегата зерен кварца предопределено закономерным расположением удлиненных зерен кварца относительно поверхности напластования.

Приведенные данные указывают на возможность существования неизвестного ранее структурообразующего фактора, природа которого подлежит уточнению, и определяют проведение более детальных исследований, направленных на уточнение природы взаимодействия зерен в агрегате. При решении этой проблемы в первую очередь было необходимо изучить основной типоморфный признак обломочного кварца — его форму — и выявить характер связи формы обломочного зерна с кристаллической структурой минерала.

Ф и г. 3. Ориентировка зерен кварца в пропластке песка, слабо сцементированном окислами железа, на различных сечениях образца. Обзорные диаграммы (100 замеров)

$a-v$ — ориентировка оптических осей зерен кварца (изолинии 1–2–3 > 4%, max = 5%); $a'-v'$ — ориентировка тех же зерен по удлинению, z — схема расположения изучаемых участков в образце

О связи между удлиненной формой зерен обломочного кварца и его оптической осью

Несмотря на предпринимавшиеся исследователями усилия [74, 87 и др.], обломочный кварц осадочных пород все еще остается малоинформативным минералом; результаты его исследования практически не выходят за рамки формального описания. Сказанное в полной мере относится и к результатам изучения одного из главнейших типоморфных признаков кварца — его форме.

Из ряда возможных факторов, с которыми может быть связано образование общеизвестной удлиненной формы зерен обломочного кварца, внимание исследователей начинает привлекать фактор разрушения [147, 148, 164, 165 и др.]. При таком подходе предполагается, что в условиях выветривания или при транспортировке обломочного материала в бассейны седиментации становление удлиненной формы зерен в основном связано с раскрытием закономерно расположенных внутризеренных нарушений, существовавших в исходном кварцевом материале. Первичная форма зерен кварца исходной породы и последующая абразия на форму обособляющих фрагментов обломочного кварца существенно не влияют [74, и др.].

Высказываемые в общей форме представления о связи удлиненной формы обломочного кварца с внутризеренными нарушениями требуют уточнения закономерностей их развития в кристаллической структуре кварца, что и выполнено в данном разделе.

Внутризеренные нарушения кварца (микродеформационные структуры)

Закономерности развития внутризеренных нарушений. Изучение внутризеренных нарушений — микродеформационных структур, проводимое в шлифах под микроскопом, продолжается уже почти столетие [167 и др.], однако вопросы их генезиса остаются до сих пор предметом дискуссии. Сказанное относится не только к рассматриваемому в данной работе кварцу, но и к остальным породообразующим минералам, в зернах которых отмечались аналогичные нарушения: плагиоклазам, амфиболам, пироксенам, биотитам, гранатам, оливину и др. [56].

Внутризеренные нарушения встречаются в различных геологических условиях, характеризующихся весьма широким диапазоном температур, давлений, особенностей нагружения и скоростей деформирования: от условия регионального метаморфизма до условий выветривания и шокового метаморфизма, связанного с метеоритным ударом или ядерным взрывом. Такие нарушения развиваются только в отдельных зернах породы и не распространяются на зерна соседние; однотипные внутризеренные нарушения ориентированы в пределах зерна однозначно — субпараллельно (таблица I, см. в конце книги).

Было установлено, что микродеформационные структуры, изучавшиеся как на природных объектах, так и на искусственных, полученных в условиях опытов [125, 128, 140, 162], в своем развитии могут быть связаны с пластической деформацией, с хрупким разрушением, а также с явлениями витрификации и полиморфных превращений.

Для породообразующего кварца были установлены следующие разновидности

ности микродеформационных структур: деформационные полосы (пластинки) — серии плоскостей, выходы которых на поверхности зерна отчетливо наблюдаются благодаря фазовому контрасту в зонах нарушения сплошности или благодаря тому, что оптическая ориентировка основного зерна и деформационной пластинки отличаются друг от друга (до первых градусов; таблица I, а); полосы изгиба — узкие ленточные зоны, отличающиеся оптической ориентировкой от вмещающего зерна; полосы Бёма — серии точечных газовой-жидких включений, расположенных по границам деформационных полосок и самостоятельно (таблица I, б); планарные трещины — серии весьма тонких сближенных трещин, напоминающих трещины спайности; планарные элементы — многократные субпараллельные нарушения сплошности, а также тонкие (1–2 мкм) прослойки изотропного кварцевого стекла или включения высокобарных фаз [56].

Результаты изучения внутризеренных нарушений кварца на электронномикроскопическом уровне подтвердили морфологическое разнообразие микродеформационных структур: показали зоны сплетения дислокаций, субзеренные границы, узкие субзерна, восстановленные зоны (частично содержащие области пузырьковых включений), субпараллельную микротрещиноватость, прослойки и линзы стеклообразного кварца [60 и др.].

Однако главное в развитии наблюдаемых в кварце микродеформационных структур не столько в морфологическом их разнообразии, сколько в общих закономерностях их развития. По мнению автора, самое примечательное в их развитии следующее: развитие внутризеренных нарушений не контролируется положением участков зерна, наиболее подверженных интенсивному воздействию со стороны зерен соседних. Например, верхние зерна как бы "вдавлены" в зерно с деформационными полосками, но это воздействие непосредственно не влияет на ориентировку развитых в зерне внутризеренных нарушений (таблица I, а).

Вторая характерная особенность развития внутризеренных нарушений, по данным автора: если оптическая ориентировка зерен агрегата на узорах диаграммах выражена слабо, то и пространственная ориентировка однотипных внутризеренных нарушений в породе на узорах соответствующих диаграмм будет неоднозначной; если же оптическая ориентировка зерен агрегата отчетлива, то суммарная пространственная ориентировка однотипных внутризеренных нарушений на узорах диаграмм будет отчетлива.

Установленный нами характер связи между оптической ориентировкой зерен и наблюдаемыми в них внутризеренными нарушениями однозначно указывает на существование зависимости между развитием рассматриваемых нарушений и кристаллической структурой минерального зерна.

На эту же связь (третья особенность) достаточно определенно указывают результаты широко проводившегося и проводимого изучения ориентировки внутризеренных нарушений относительно оптической оси минерального зерна. Напомним, что ориентировка микродеформационных структур в пределах минеральных зерен породы определяется на Федоровском столике путем измерения углов между полюсами плоскостей соответствующих нарушений и оптической осью зерна. Получаемые таким образом данные для порообразующего кварца неоднократно систематизировались. В качестве примера укажем на работу [125], согласно данным которой преобладающие углы между перпендикулярами к плоскостям внутризерен-

ных нарушений (деформационные полоски) и оптическими осями могут быть сгруппированы в трех интервалах: 8–36, 53–59, 72–75°. Три интервала углов в своей основе подтверждены и результатами последующих исследований [120, 132 и др.].

Весьма интересно, что достаточно близкие к указанным углы получены не только при изучении деформационных полосок. По литературным данным, подобные угловые соотношения могли быть встречены практически в каждом типе развитых в кварце микродеформационных структур. По мнению исследователей, рассматривающих этот вопрос [162 и др.], тот факт, что указанные выше три интервала угловых соотношений могут практически встречаться в каждом типе микродеформационных структур, в первую очередь характеризует недостаточную степень изученности явления: в одну и ту же группу относят морфологические сходные, но различные по генезису внутризеренные нарушения.

Подобные представления позволяли предположить наличие вполне определенных углов наклона плоскостей нарушений к оптической оси зерна кварца для каждого типа микродеформационных структур, что и было проверено. В ходе проверки выяснилось, что для уточнения природы микродеформационных структур было бы более рационально иметь представление об истинных углах наклона плоскостей внутризеренных нарушений относительно оптической оси зерна. Автор воспользовался имеющимися в петрографической литературе данными о наблюдаемых в зернах кварца углах между оптическими осями зерен и перпендикулярами к плоскостям внутризеренных нарушений и на их основе уточнил непосредственные углы наклона указанных плоскостей к оптической оси (90° минус угол между оптической осью и перпендикуляром к соответствующей плоскости внутризеренного нарушения).

Анализ богатого литературного материала с указанных позиций показал (табл. 1), что в подавляющем большинстве случаев, развитые в кварце плоскости внутризеренных нарушений наклонены к оптическим осям зерен под углами 20, 45, 70° ($\pm 10\%$). Для каждого типа микродеформационных структур существует свой наиболее часто встречаемый угол наклона плоскости нарушения к оптической оси зерна: для деформационных полосок и полос изгиба $\sim 20^\circ$, для планарных трещин $\sim 45^\circ$, планарных элементов $\sim 70^\circ$. Нетрудно видеть, что каждое из указанных угловых соотношений достаточно наглядно отражает как внешние условия, в которых происходило развитие внутризеренных нарушений, так и механизм, лежащий в основе его развития. Так, ориентировка плоскостей внутризеренных нарушений под углом $\sim 20^\circ$ к оптической оси характеризует вязкое разрушение в условиях сжатия (разрушение, которому предшествовала пластическая деформация материала). Как показали наши исследования [38], при интенсивной пластической деформации зерна кварца в деформируемом агрегате удлиняются под углом $\sim 20^\circ$ к оптической оси.

Развитие нарушений под углом 45° может характеризовать хрупкое разрушение кварца в условиях растяжения. Как показали проведенные исследования [35], при дроблении кварца в условиях опыта были получены фрагменты с ориентировкой длинных осей зерен под углом 45° к их оптическим осям; условия опыта соответствовали условиям растяжения [1]. Развитие внутризеренных нарушений под углом 70° к оптиче-

Таблица 1

Литературные данные о различных типах микронарушений,
развитых в зернах кварца и углах их наклона
(в градусах относительно оптической оси зерна)

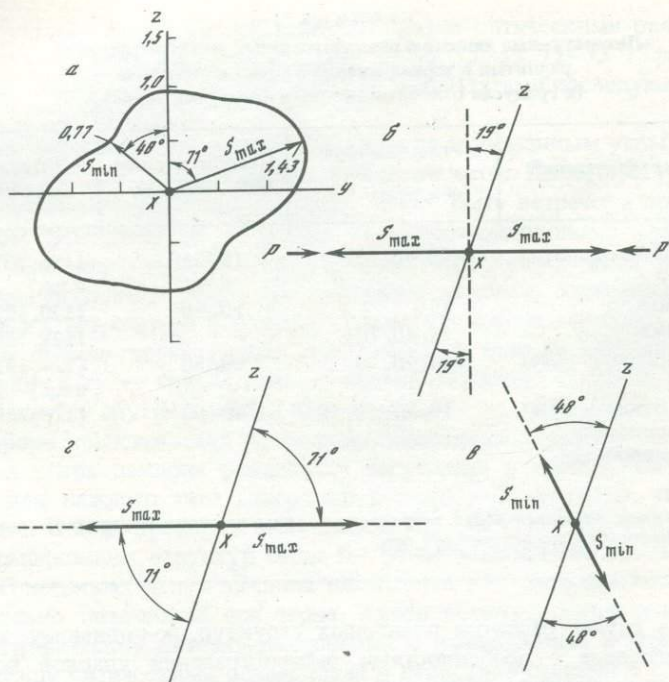
Тип микронарушений	Углы наклона к оптической оси зерна	Преобладающие углы наклона	Литературные источники
Деформационные полоски (пластинки)	20, 40, 70	15–25	[125, 133, 162 и др.]
Полосы изгиба	15	10–16	[120, 122 и др.]
Полоски Бёма	10, 40, 70		[128, 153 и др.]
Планарные (плоскостные) элементы	15, 40, 70	60–80	[124, 132, 154 и др.]
Планарные (плоскостные) трещины, кливажные трещины, трещины раскальвания	10, 40–50, 70	40–50	[128, 140 и др.]

Использованы наиболее часто встречаемые углы наклона внутризеренных микронарушений относительно оптической оси.

ской оси в случае развития планарных структур, по-видимому, характеризует связанные с особенностями распространения ударной волны и обусловленные сдвигом подвижки, а в ряде случаев – витрификацию и образование высокобарных фаз [56].

О связи внутризеренных нарушений с упругими свойствами кварца. Объяснить физический смысл установленного закономерного развития микродеформационных структур относительно оптических осей зерен кварца с позиций распространенных в литературе представлений не удастся. Существующие представления, основанные на "геометрии деформации" [118 и др.], "геометрии кристалла" [154, 162 и др.], на физико-механических свойствах индивидов агрегата [65, 126, 157 и др.], недостаточно полно вскрывают физическую природу явления, поскольку связь морфологии кристалла кварца с особенностями его кристаллической структуры и физическими свойствами, а также с изменениями последних в зависимости от изменения внешних условий обычно трактуется излишне упрощенно, а в ряде случаев вообще не учитывается.

Для уточнения природы явления проведем дополнительное изучение особенностей развития микродеформационных структур в порообразующем кварце. Для этой цели сопоставим данные об особенностях развития внутризеренных нарушений с основным свойством кристаллической структуры минерала – его упругими свойствами. Для характеристики упругих свойств обратимся к упругим свойствам наиболее устойчивого в поверхностной части Земли низкотемпературного кварца [109 и др.]. Воспользуемся модулями податливости [S_{ij}] – величинами, обратными модулям (коэффициентам) нормальной упругости в направлении главных осей [4 и др.], что практикуется при описании деформации при заданных напряжениях и расчетах термодинамически устойчивой ориентировки минералов [145 и др.].



Фиг. 4. Схема, иллюстрирующая особенности развития микродеформационных структур в зерне кварца горной породы

a — сечение *yz* указательной поверхности модуля податливости низкотемпературного кварца; единица масштаба соответствует 10^{-12} см²/дину (по [119] с изменениями); S_{max} — максимальное значение модуля податливости, S_{min} — минимальное значение модуля, *z* — оптическая ось, *b*—*z* — ориентировка остаточных нарушений в зерне кварца относительно его оптической оси (пунктирная линия); при пластической деформации в условиях ориентированного сжатия *P* — направление действующей силы (*b*), при хрупком разрушении в условиях растяжения (*b*) и в условиях сдвига (*c*)

Рассмотрим одно из трех сечений указательной поверхности модуля податливости низкотемпературного кварца, где значения модуля наиболее резко различаются между собой, — в плоскости *yz*, а также положение в данном сечении оптической оси и рассмотренных выше трех систем внутризеренных нарушений (фиг. 4); построение выполнено для правого кварца, для левого оно аналогично.

На фиг. 4, *b* нетрудно видеть, что в случае развития микродеформационных структур под углом $\sim 20^\circ$ к оптической оси (вязкое разрушение) последние ориентируются субперпендикулярно максимальному значению модуля податливости. При развитии нарушений к оптической оси зерна под углом $\sim 45^\circ$ (*b*) — условие растяжения — их ориентировка практически совпадает с направлением ориентировки минимального значения модуля податливости. В том случае, когда внутризеренные нарушения развиваются относительно оптической оси зерна под углом $\sim 70^\circ$ (*c*) — условие сдвига — их ориентировка совпадает с направлением максимального значения модуля податливости.

Несмотря на то, что развитие внутризеренных нарушений связано обыч-

но только с одним из трех сечений zy , в ряде случаев при изучении планарных микроструктур наблюдается развитие трех систем нарушений, ориентированных в пределах зерна друг относительно друга под углом 120° и наклоненных к оптической оси зерна под одним и тем же углом ($\sim 70^\circ$).

Результаты проведенного сопоставления достаточно определенно указывают на главное: четкую связь наблюдаемых в зернах кварца трех выявленных систем внутризеренных нарушений с ориентировкой его упругих констант, точнее — с анизотропией модуля податливости (или анизотропией модуля упругости), так как модуль податливости S_{11} — модуль упругости C_{11} и т.д.

Представление о связи развивающихся в кварце остаточных нарушений с анизотропией (изменением в зависимости от направления) упругих свойств индивида однозначно подтверждается изысканными экспериментами Ю.С. Боярской [12], изучавшей в минералах закономерности упругого восстановления отпечатков после снятия индентора. Применяв прямой метод измерения, Ю.С. Боярская показала, что в монокристалле кварца анизотропия упругого восстановления отпечатков индентора хорошо согласуется с анизотропией модуля Юнга.

Особенности формирования удлиненной формы зерен обломочного кварца

Форма обломочных зерен кварца рассматривается как наглядное следствие анизотропии его прочности. В форме обломочного кварца как бы записана анизотропия разрушения, т.е. указано, в каком направлении кварц исходной породы разрушался легче и в каком труднее. При данном подходе проблема генезиса удлиненной формы кварца рыхлых осадочных пород решается на основе изучения возможной связи удлиненной формы зерен обломочного кварца с его внутренним строением; последнее устанавливается на основе статистического изучения угловых соотношений между длинной осью зерна и его оптической осью.

Характеристика исходных материалов. Для исследования были взяты два резко различающихся между собой типа песка: природный и искусственный.

Люберецкий песок (верхняя юра) характеризуется размерами зерен 0,25–0,15 мм, содержит кремнекислоты 99,9%, окислов железа (в среднем) 0,05%. Пористость рыхлого агрегата зерен (на основе изучения структурных карт) $50 \pm 1,4\%$. Под биноклем песок обычно представлен (таблица II, а) зернами кварца неправильной формы. В зернах почти всегда можно установить преобладающее удлинение (при соотношении длинных и коротких осей зерен 1:2 и более). Наличие окатанных, изогнутых, сложных поверхностей ограничения создает представление об округлости зерен; острые грани редки. В отдельных зернах встречаются признаки возможной пластической деформации (аномальное угасание); иногда отмечаются мелкие трещинки. Встречаются поликристаллические зерна и зерна с матовой поверхностью.

”Искусственный песок” представляет собой фракцию размерами 0,15–0,25 мм, полученную дроблением в ступке (и отсевом) естественного водяно-прозрачного хорошо оgranенного монокристалла кварца одного

из месторождений Сибири. Зерна кварца (таблица II, б) представлены в основном остроугольными обломками, иногда с резко выраженным удлинением (до 1:6). Пористость рыхлого агрегата $52 \pm 2,5\%$. Изучением обломочного кварца различных типов по структурным картам типа приведенный на фиг. 5, установлено, что форма зерен обусловлена развитием совокупности рациональных и иррациональных поверхностей ограничения (последние преобладают). Связь удлинённых форм зерен с преимущественным развитием габитусных форм идеального кристалла кварца однозначно не установлена.

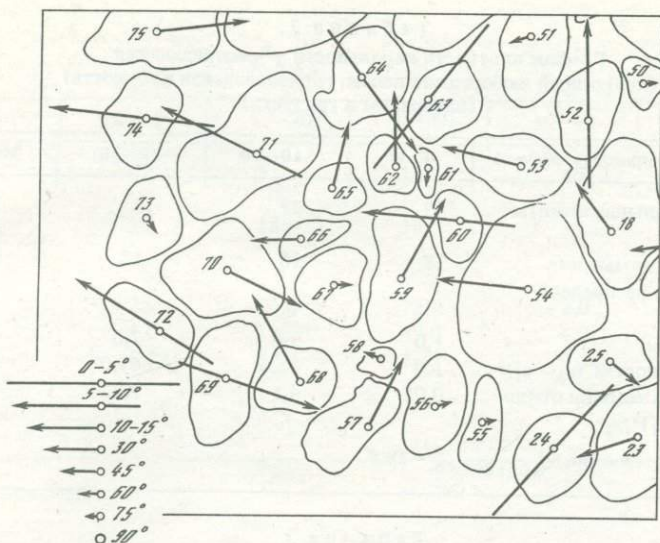
Результаты изучения угловых соотношений между длинными осями зерна и их оптическими осями. Природный люберецкий песок. Результаты измерения указанных углов на горизонтальной плоскости при 162 замерах (табл. 2) представлены в виде гистограмм на фиг. 6, а. Обработав результаты по принятой методике, получаем значение $\chi^2 = 16,98$. Сопоставление этого значения χ^2 с величиной его допустимого значения при восьми степенях свободы ($\chi_{0,05}^2; 8 \text{ ст. св} = 15,5$) показывает, что при данном числе наблюдений рассматриваемое распределение отличается от равномерного.

Уточним общий характер отклонения результатов испытаний от равномерного распределения, для чего, соединив точки значений квадратов средневзвешенных отклонений, получим ломаную линию (кривую) квадратов средневзвешенных отклонений от теоретического равномерного распределения [$v_i - v_i'$] $^2/v_i'$] (а). Совмещение этой ломаной линии с гистограммой, построенной по экспериментальному материалу, показывает, что кривая имеет максимум в интервале $10-20^\circ$ и минимум в интервале $60-70^\circ$.

Уточнение особенностей угловых соотношений при большом числе замеров (305) на той же горизонтальной плоскости показало, что установленный ранее характер гистограммы не изменяется: максимум в интервале $10-20^\circ$, минимум в интервале $60-70^\circ$. Для выяснения вопроса о достоверности распределения рассматриваемых угловых величин было проведено аналогичное изучение на вертикальной плоскости (перпендикулярной выше рассмотренной). По проведенным замерам (313) составлена гистограмма и проведена проверка статистической гипотезы о равномерном распределении (б).

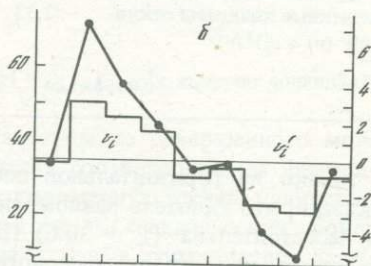
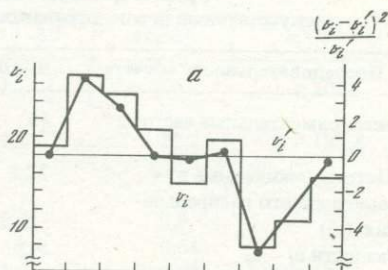
Расчеты показывают, что в рассматриваемом случае гипотеза равномерного распределения несостоятельна в такой же степени, как и в случае горизонтальной плоскости (вычисленное значение $\chi^2 = 24,40$, табличное значение $\chi_{0,05}^2; 8 \text{ ст. св} = 15,5$). Характер гистограмм также одинаков (максимум в интервале $10-20^\circ$, минимум при $60-80^\circ$). Сходство гистограмм на двух взаимно перпендикулярных сечениях образца показывает, что статистическая значимость выявленных закономерностей одинакова. Отсюда следует: 1) установленное распределение угловых величин (удлинение зерна — оптическая ось) — общая закономерность для зерен кварца рассматриваемого кварцевого песка; 2) положение плоскости среза не играет решающей роли, так как угловые соотношения могут быть установлены по предлагаемой методике практически в любом сечении.

Искусственный кварцевый песок. Угловые соотношения между длинными осями зерен и осями оптическими рассматривают-



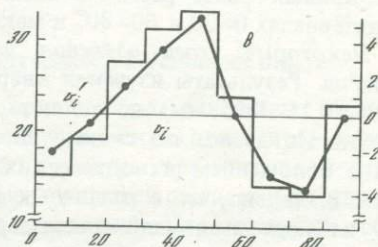
Ф и г. 5. Выкопировка из структурной карты природного песка

Номера на зернах кварца — порядковые номера замеров. Стрелки указывают пространственную ориентировку и углы наклона оптических осей зерен к плоскости шлифа. Масштаб углов наклона оптических осей приведен в левой части карты



Ф и г. 6. Проверка гипотезы о равномерном распределении углов между положением оптической оси и длинной осью в зернах кварца

a — горизонтальная плоскость, 162 замера; *б* — вертикальная плоскость, 313 замеров (*a* и *б* — люберецкий песок); *в* — мелкодробленый кварц, 200 замеров; v_i — гистограмма распределения углов; v_i^0 — теоретическое равномерное распределение углов; пунктир соединяет квадраты средних взвешенных отклонений от теоретического равномерного распределения [масштаб $(v_i - v_i^0)^2 / v_i^0 = 1:1$]



Т а б л и ц а 2
График плотности вероятности χ^2 -распределения
(природный люберецкий песок, горизонтальная плоскость)
(интервалы в градусах)

Последовательность обсчета	0-10	10-20	20-30	30-40
Экспериментальные частоты (v_i)	19	27	25	21
Частоты, ожидаемые для равномерного распределения (v_i')	18	18	18	18
Разности $v_i - v_i'$	1,0	9,0	7,0	3,0
Квадраты разностей $(v_i - v_i')^2$	1,0	81,0	49,0	9,0
Взвешенные квадраты отклонений $(v_i - v_i')^2/v_i'$	0,05	4,5	2,72	0,5

Табличное значение $\chi^2_{0,05; 8 \text{ ст.св}} = 15,5$.

Т а б л и ц а 3
График плотности вероятности χ^2 -распределения
(искусственный песок, горизонтальная плоскость; интервалы в градусах)

Последовательность обсчета	0-10	10-20	20-30	30-40
Экспериментальные частоты v_i	15	19	28	31
Частоты, ожидаемые для равномерного распределения (v_i')	22,2	22,2	22,2	22,2
Разности $v_i - v_i'$	-7,2	-3,2	5,8	8,8
Квадраты разностей $(v_i - v_i')^2$	51,84	10,2	33,6	77,4
Взвешенные квадраты отклонений $(v_i - v_i')^2/v_i'$	2,33	0,46	1,51	3,49

Табличное значение $\chi^2_{0,05; 8 \text{ ст.св}} = 15,5$.

ся только на горизонтальной плоскости (фиг. 6, в). Расчеты (табл. 3) показали, что гипотеза равномерного распределения в данном случае также несостоятельна ($\chi^2 = 20,0$). Построенная кривая взвешенных квадратов отклонений от равномерного распределения $(v_i - v_i')^2/v_i'$ отличается от кривых ранее рассмотренных примеров наличием двух минимумов в интервалах 0-20 и 60-80° и максимума при 45°.

Некоторые итоги изучения удлиненной формы зерен обломочного кварца. Результаты изучения кварцевых зерен на узкой размерной фракции (0,15-0,25 мм) позволяют сопоставлять полученные данные между собой. Показано, что связь удлиненной формы обломочных зерен кварца с положением их оптических осей устанавливается лишь статистически. Выявлено, что в различных типах песков преобладающие углы между наблюдаемым удлинением зерен и их оптическими осями различны: 10-20° для зерен кварца природного люберецкого песка, 35-55° для зе-

40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	$n = 9$
15	20	8	11	16	$\Sigma = 162$
18	18	18	18	18	$\Sigma = 162$
-3,0	2,0	-10,0	-7,0	-2,0	
9,0	4,0	100,0	49,0	4,0	
0,5	0,22	5,55	2,72	0,22	$\Sigma = 16,98$

40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	$n = 9$
33	24	14	13	23	$\Sigma = 200$
22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	$\Sigma = 199,8$
10,8	1,8	-8,2	-9,2	0,8	
116,6	3,2	67,2	84,6	0,64	
5,25	0,14	3,02	3,8	0,00	$\Sigma = 20,0$

рен искусственного песка, полученного автором из совершенного монокристалла кварца путем дробления и отсева соответствующей фракции.

Полученные данные указывают на закономерную связь удлиненной формы обломочного зерна с анизотропией физико-механических свойств кварца. Самое главное — установленные угловые соотношения весьма близки аналогичным углам, выявленным при изучении микродеформационных структур (фиг. 4).

Ориентированное строение песка, полученного в условиях опыта

Приведенные выше результаты также не позволяют однозначно объяснить наблюдавшуюся в примере на фиг. 3 оптическую ориентировку зерен новообразованной седиментационной структуры ориентировкой слагающих ее зерен по удлинению (хотя в пределах зерен статистически связь между удлинением и оптической осью установлена). Для уточнения осо-

бенностей возникающих в ходе формирования осадочной породы закономерных связей между ее зернами и уточнения природы этих связей требуется проведение дальнейших исследований. Подобные исследования целесообразно начинать с уточнения особенностей развития ориентированного строения (оптической ориентировки и ориентировки зерен по удлинению) песка, полученного в условиях опыта.

Для уточнения природы структурообразования песчаной породы при седиментации были поставлены две серии опытов: опыты по седиментации в цилиндрической форме и опыты по седиментации в плоской форме. В каждой серии опытов исследования проводились на природном люберецком и искусственно полученном кварцевом песке.

Опыты по седиментации в цилиндрической форме. Опыты данной серии проводили так. В укрепленную неподвижно трубку диаметром 15 мм засыпали тонкой струей песок (примерно до высоты 20 мм), затем его цементировали карбонильным клеем. После полимеризации клея образец разрезали вдоль оси трубки и из сцементированного агрегата зерен кварца приготавливали шлиф, в котором и изучали ориентировку зерен.

Результаты этой серии опытов используются при рассмотрении ориентированного строения искусственной кварцевой породы (фиг. 32).

Природный люберецкий песок. Изучение ориентированного строения породы сводилось к тому, что диаграмм ориентировки зерен кварца, построенные по большому числу замеров (300—400), суммарные диаграммы, сравнивали с серией диаграммы с уменьшающимся числом замеров; последние построены для различных участков изучаемой площади шлифа (обзорные — 100 замеров, частные — 50 замеров, местные — 25 замеров).

Замеры оптической ориентировки обрабатывали одним и тем же 1%-ным трафаретом Пронина, и полученные узоры диаграммы сопоставляли между собой. Построение диаграмм ориентировки зерен по удлинению стандартное. Узоры диаграмм сопоставлялись. Исследования подобного типа в практике микроструктурного анализа не проводились, поэтому полученные результаты рассматриваются подробно.

В изучаемом шлифе были выделены четыре участка прямоугольной формы (каждый из которых содержал 100 зерен кварца). Схемы положений участков замеров приведены в верхнем левом углу соответствующих диаграмм. Изучение особенностей ориентированного строения рыхлого агрегата зерен кварца показало следующее.

На суммарных диаграммах (фиг. 7, *a* и *a'*, см. вкл.), построенных на основе замеров для четырех участков шлифа (400 замеров) и для трех участков (300 замеров; *b* и *b'*), можно видеть следующее. В ориентировке зерен по удлинению в обоих случаях наблюдается тенденция к расположению их длинных осей в направлении, перпендикулярном оси цилиндра (в горизонтальном направлении). Оптическая ориентировка зерен слабая. Плотность максимумов едва достигает 3—4%. Диаграммы оптической ориентировки с диаграммами ориентировки тех же зерен по удлинению непосредственно не сопоставимы, особенности ориентировки одной диаграммы не могут быть объяснены на основе изучения узоров другой. Отметим, что при сравнении узоров диаграмм оптической ориенти-

ровки (*a* и *b*) проявляется тенденция к увеличению четкости узоров диаграммы с уменьшением числа замеров.

По сравнению с суммарными диаграммами при уменьшении числа замеров до 100 четкость узоров обзорных диаграмм оптической ориентировки зерен на рассматриваемых участках возрастает (плотность максимумов до 5–6%) при общей тенденции ухудшения ориентировки зерен по удлинению. Ориентировка зерен кварца по удлинению на разных участках различна. Оптическая ориентировка зерен кварца, судя по узорам микроструктурных диаграмм, также различна. Более четко она проявляется в верхней части (*в*) образца, менее четко в центральной части (*г*).

Особенности ориентировки зерен кварца диаграммы участка *в* при еще меньшем числе замеров (50) следующие [изучение проводилось на двух участках, ориентированных параллельно оси цилиндра (*d* и *e*)]: ориентировка зерен по удлинению на частных диаграммах (*d'* и *e'*) может быть различной; оптическая ориентировка (диаграммы *d* и *e*) зерен кварца частных диаграмм более отчетлива (максимумы до 14%); пространственное положение максимумов различно.

Дополнительно была изучена ориентировка обзорной диаграммы (*в*) на локальных участках на основе 25 замеров (*ж* и *з*). Несмотря на столь малое количество замеров и постоянный 1%-ный графарет Пронина, все диаграммы оптической ориентировки имеют достаточно четко проявленные максимумы (плотность их может быть более 16%). Отличие состояло лишь в различной пространственной ориентировке максимумов диаграмм. Соотношение узоров диаграмм оптической ориентировки зерен и их ориентировки по удлинению такое же, как в рассмотренном ранее случае; они однозначно не коррелируются.

Ориентировка зерен по удлинению (*ж'* и *з'*) для рассматриваемых местных участков различна, так как зерна кварца на каждом участке практически имеют свою ориентировку, однозначно не связанную с диаметром применявшейся в опыте трубки и возможной "поверхностью напластования".

Сказанное выше об особенностях ориентировки зерен кварца справедливо не только для участка *в* на фиг. 7, имеющего отчетливую оптическую ориентировку, но и вообще для любого из рассмотренных четырех участков (*a*).

Изучение особенностей проявления отдельного максимума диаграммы оптической ориентировки в структуре агрегата зерен показало следующее: отдельный максимум диаграммы обычно образован единичными зернами, распределенными на изучаемой площади в массиве других зерен, обладающих иной оптической ориентировкой: парное расположение зерен, относящихся к различным максимумам, наблюдалось.

Изучение ориентировки образующих максимумы зерен кварца по удлинению каких-либо определенных закономерностей не выявило. Непосредственное сопоставление оптической ориентировки зерен кварца, образующих отдельные максимумы, с ориентировкой их по удлинению не вскрывает связи между этими типами ориентировок. Для проверки полученных результатов было проведено подобное исследование еще в одном образце; были получены аналогичные результаты.

Искусственный кварцевый песок. Изучение ориентиров-

ки зерен кварца проводилось только на одном участке шлифа (характеризующем осевое сечение образца). Ниже кратко излагаются результаты. Ориентировка зерен по удлинению на частных диаграммах показывает общую тенденцию к расположению длинных осей зерен мелкодробленого кварца в субгоризонтальном направлении. Узоры частных диаграмм оптической ориентировки зерен мелкодробленого кварца имеют различное пространственное положение максимумов на различных участках (плотность максимумов до 8%). Последнее приводит к тому, что узор обзорной диаграммы оптической ориентировки проявляется слабо (плотность максимумов не доходит до 4%).

Ориентировка зерен мелкодробленого кварца по удлинению на обзорной диаграмме в отличие от диаграммы оптической ориентировки весьма четко указывает, что зерна мелкодробленого кварца однозначно ориентированы в субгоризонтальном направлении (параллельно поверхности "напластования"). Изучение проявления отдельного максимума диаграммы в структуре агрегата зерен показывает, что все его основные особенности (начиная от ориентировки зерен по удлинению и кончая расположением зерен в структуре агрегата) не отличаются от аналогичных особенностей, установленных для природного люберецкого песка.

Подводя итог изучения ориентировки агрегата мелкодробленого кварца в условиях опыта, отметим, что она в принципе не отличается от ориентировки агрегата зерен кварца природного люберецкого песка, рассмотренного ранее (за исключением несколько более четко проявленной ориентировки зерен по удлинению).

В заключение раздела отметим, что полученные в опыте седиментационные структуры агрегата обломочного кварца характеризуются определенно ориентированным строением. Последнее устанавливается на основании изучения ориентировки зерен кварца по удлинению и их оптической ориентировки. Тенденция развития указанных ориентировок при увеличении числа замеров различна. Так, ориентировка зерен по удлинению при малом числе замеров лишена однообразия. При увеличении числа замеров до 100 наблюдается тенденция к ориентировке длинных осей зерен перпендикулярно оси цилиндрической формы. С увеличением числа замеров до 400 эта тенденция сохраняется, интенсивность ее проявления возрастает незначительно (люберецкий песок; фиг. 7). Несмотря на достаточно отчетливо проявленную ориентировку зерен по удлинению, оптическая ориентировка зерен при увеличении числа замеров на диаграммах становится все менее интенсивной; при большом числе замеров она практически изотропна (фиг. 7).

Некоторые выводы. Специфика оптической ориентировки седиментационной структуры, судя по полученным данным — и это новое, заключается в том, что отдельные группы зерен кварца (при 25—30 замерах) имеют на диаграммах достаточно четко выраженную ориентировку. Но эти группы зерен занимают в пространстве различное положение, чем и обусловлено ухудшение совершенства узоров диаграмм оптической ориентировки при увеличении числа замеров. Непосредственное сопоставление между собой оптической ориентировки зерен с ориентировкой зерен по удлинению практически невозможно. При любом числе замеров с позиций ориентировки одного типа ориентировка другого

типа не может быть объяснена. Установленная закономерность зафиксирована в агрегатах с различным типом зерен (природный и искусственный песок).

В целом приведенные данные подводят к выводу о том, что существующие теоретические представления не объясняют всех особенностей ориентированного строения рыхлой песчаной породы.

Установленная четкая пространственная ориентировка в пределах отдельных групп зерен (25–50) однозначно указывает, что ближний порядок — основная особенность седиментационных структур песчаных пород. С позиций существующих в литературе представлений об упорядоченности в ближнем порядке в системе мы должны допустить существование нескольких противоборствующих факторов, компромисс между которыми достигается в микрообъеме породы — в пределах 25–50 зерен.

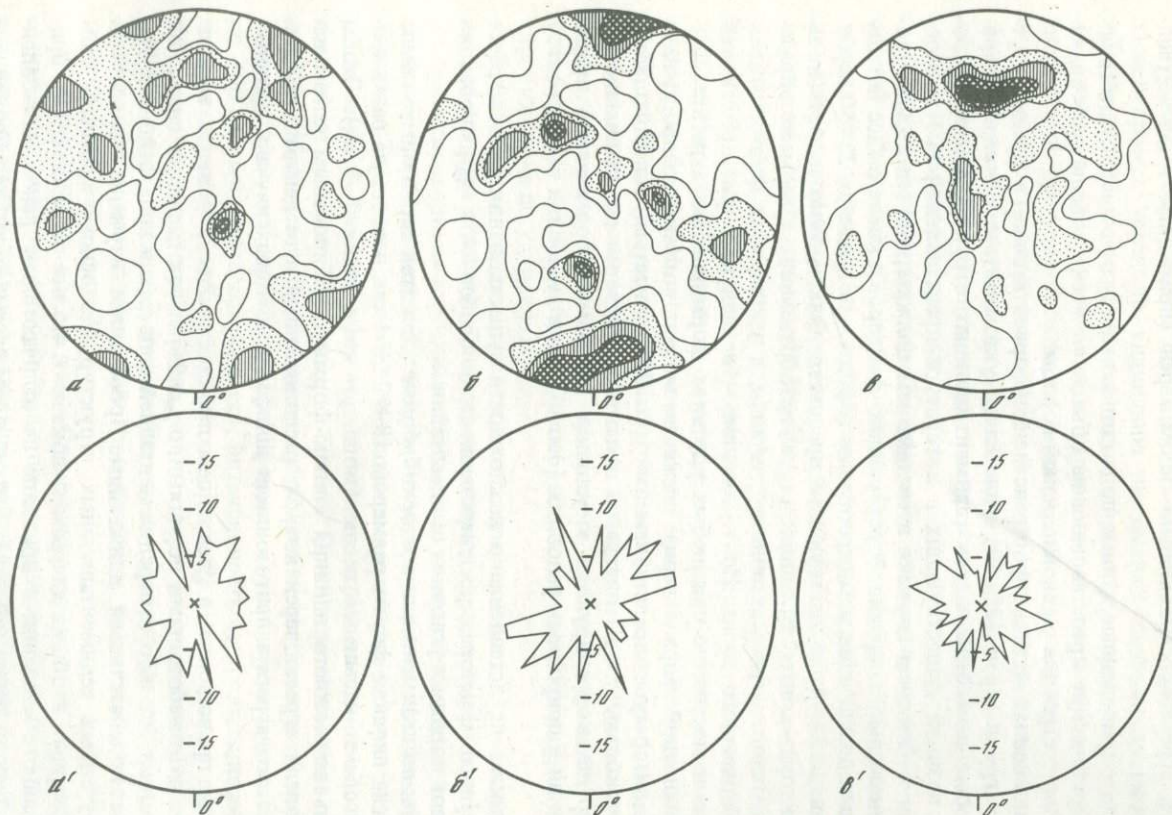
Основываясь на существующих представлениях, можно назвать лишь два фактора, контролирующих структурообразование в момент образования рыхлого агрегата: поле гравитации и удлиненная форма отдельного обломочного зерна. Но гравитация — не ведущий фактор, так как ее действие постоянно при любых условиях формирования агрегата. Фактор удлиненной формы зерна также не может, вопреки распространенным в литературе представлениям [66, 74], считаться основополагающим, поскольку узоры диаграмм ориентировки зерен по удлинению однозначно не коррелируются к узорами диаграммам оптической ориентировки ни в природных условиях (фиг. 3), ни в условиях опыта (фиг. 7 и 8).

Возникает представление о возможности существования нового, ранее неизвестного фактора, предопределяющего особенности формирования кварцевой породы в условиях седиментации.

Опыты по седиментации в плоской форме. Для этой серии опытов была применена плоская форма размером 18 × 24 × 4 см, в которую различными способами насыпался песок (мощность слоя песка 2–3 см). Чтобы избежать возможного влияния стенок формы, карбинольным клеем цементировали агрегат зерен кварца, расположенный в ее центральной части. Из этого агрегата приготавливали шлифы, в которых изучали ориентировку зерен.

Опыты проводились в следующем порядке: опыт 1 — песок насыпали через сито небольшими порциями, опыт 2 — песок насыпали сплошной струей, опыт 3 — песок перед цементацией подвергали возвратно-поступательным колебательным движениям. Проведенное изучение искусственно полученных седиментационных структур (на основе местных, частных, обзорных и общих диаграмм) показало, что все особенности их ориентированного строения в принципе не отличаются от ранее установленных (в первой серии опытов). Вместе с тем весьма отчетливо проявилась зависимость совершенства узоров диаграмм от способа насыпания песка. Именно эти данные и представляют наибольший интерес при решении вопроса о причинах появления и особенностях развития ориентированного строения седиментационной структуры.

Ниже приведены результаты изучения ориентированного строения, выполненные на основе обзорных диаграмм (100 замеров). Диаграммы такого типа, как показало проведенное ранее изучение (фиг. 7), дают чет-



Ф и г. 8. Ориентировка зерен кварца люберецкого песка, возникающая при различных условиях насыпания песка (горизонтальная плоскость). Диаграммы построены на основании 100 замеров)

a и *a'* – песок просеивался через сито, *б* и *б'* – песок насыпался сплошной струей; *в* и *в'* – песок подвергался возвратно-поступательному колебанию в форме; *a*–*в* – диаграммы оптической ориентировки (изолинии: 1–2–3–4–5 > %, max = 6%); *a'*–*в'* – диаграммы ориентировки зерен по удлинению

кое представление об ориентированном строении породы. Такое же число замеров обычно рекомендуется при проведении микроструктурных исследований в общих руководствах [50].

Природный люберецкий песок. Опыт 1. Ориентировка зерен кварца при насыпании через сито. Песок насыпали в форму небольшими порциями через сито с высоты примерно 30 см. Изучение ориентировки зерен по удлинению показало, что в трех подобных опытах такая ориентировка различна. Оптическая ориентировка была при 100 замерах также различна, но недостаточно отчетлива (типа фиг. 8, *a* и *a'*).

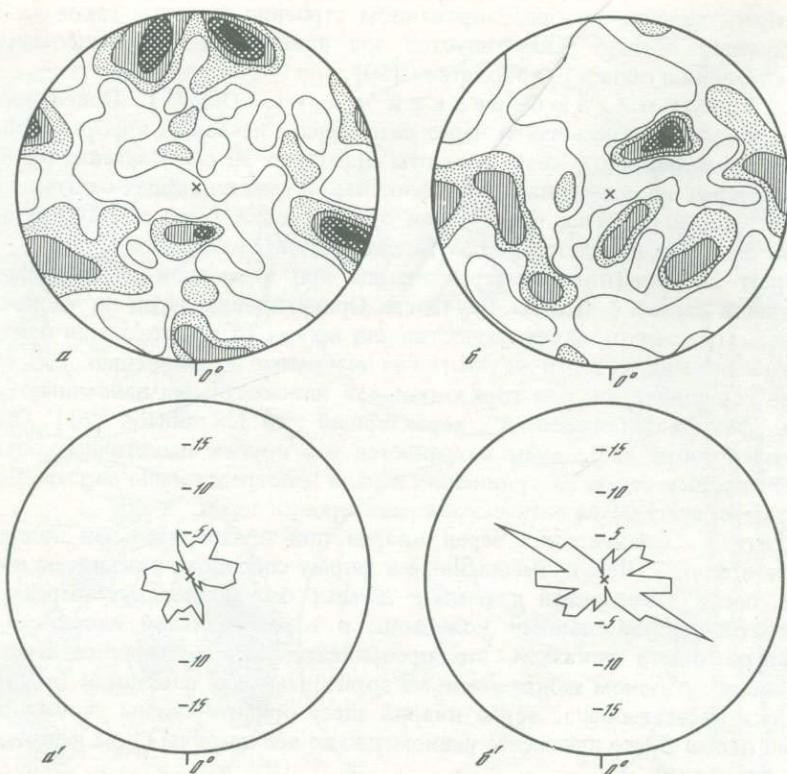
Опыт 2. Ориентировка зерен кварца при насыпании песка в форму сплошной струей с высоты 10–15 см. Ориентировка зерен по удлинению в рассматриваемом случае недостаточно четкая (*b'*). Оптическая ориентировка зерен кварца этого же участка на диаграмме по сравнению с опытом 1 более совершенная [на горизонтальной плоскости она напоминает узор типа "фигура сплющивания", характерный для тектонитов (*b*)]. Общий характер узора диаграммы сохраняется и в других аналогичных опытах. Ориентировку зерен по удлинению нельзя непосредственно связать с максимумами диаграммы оптической ориентировки зерен.

Опыт 3. Ориентировка зерен кварца при предварительной подвижке песка в форме. Песок, насыпанный в форму способом, указанным в опыте 2, перед цементацией в течение 20 мин. был подвергнут энергичному возвратно-поступательному колебанию в горизонтальной плоскости. Результаты опыта показали, что преобладающая ориентировка зерен по удлинению в одном направлении на горизонтальной плоскости (*b'*) практически отсутствовала. Зерна кварца здесь ориентированы своими длинными осями более или менее равномерно во все стороны (типа наиболее плотнейшей упаковки).

Оптическая ориентировка зерен того же участка на той же плоскости (*b*) наоборот выражена по сравнению с опытом 2 более совершенно. Один наиболее четкий максимум узора ее диаграммы (плотность максимума 6%) весьма напоминает узор диаграммы типа S-тектонита. Сопоставление столь совершенной оптической ориентировки зерен кварца с ориентировкой этих же зерен по удлинению показывает, что непосредственно сопоставить их между собой не представляется возможным: четкому максимуму выходов оптических осей диаграммы соответствует равномерная во всех направлениях ориентировка зерен по удлинению (*b* и *b'*). Указанная тенденция к увеличению степени интенсивности оптической ориентировки агрегата кварцевых зерен в процессе колебания формы песка (опыт 3) при нивелирующей ориентировке зерен по удлинению была проверена на трех взаимно перпендикулярных сечениях образцов.

Приведенный материал показывает, что в зависимости от способа насыпания песка резко зависит характер как ориентировки зерен по удлинению, так и оптической ориентировки агрегата кварцевых зерен, что отчетливо видно при сопоставлении рассмотренных диаграмм между собой.

Искусственный кварцевый песок. С целью уточнения установленной закономерности структурообразования рыхлой песчаной породы было проведено два опыта с агрегатом зерен мелкодробленого кварца. При насыпании зерен мелкодробленого кварца сплошной струей в плоскую форму ориентировка его имела следующий вид (фиг. 9).



Ф и г. 9. Ориентировка зерен мелкодробленого кварца (100 замеров, горизонтальная плоскость)

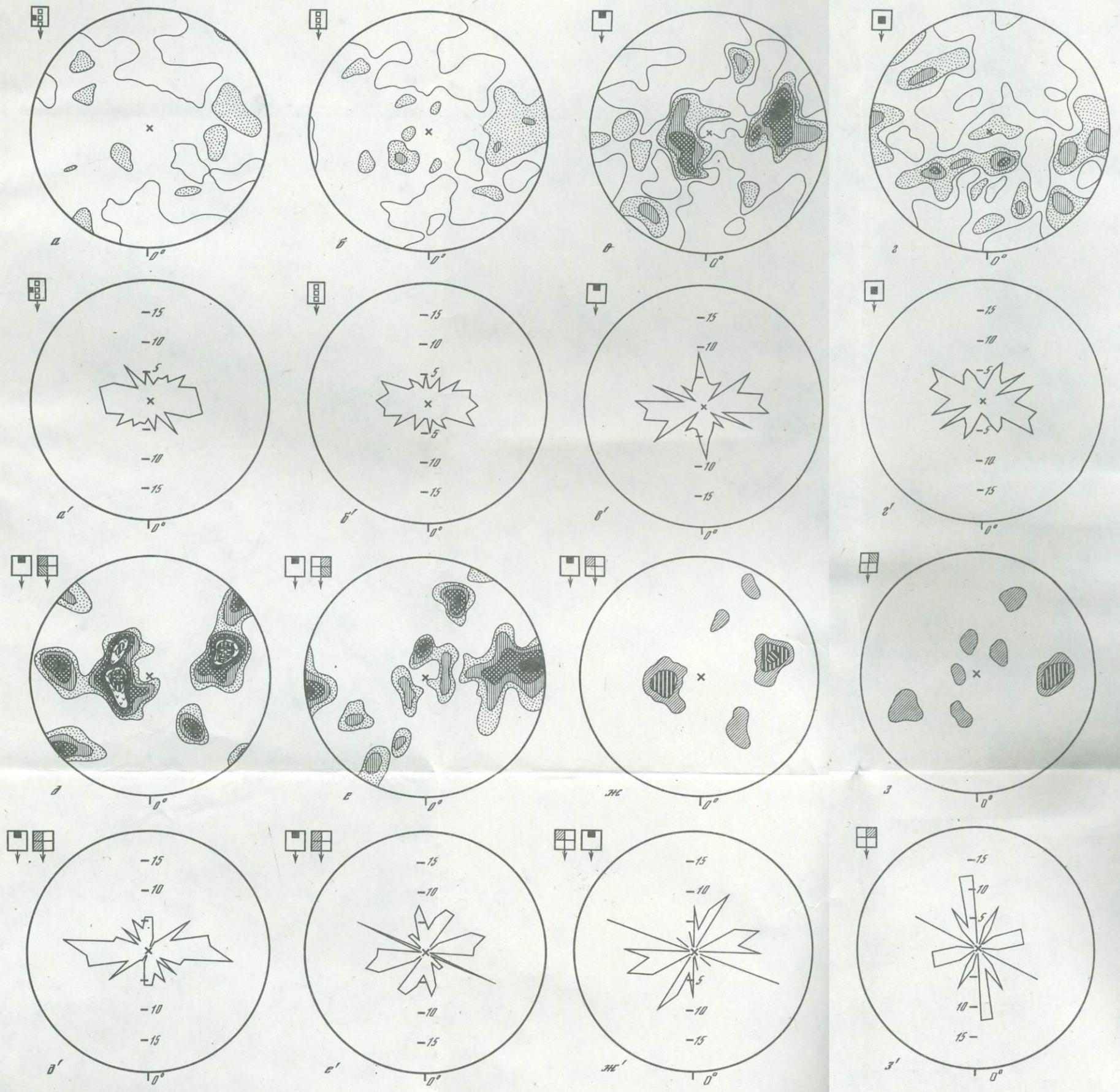
a и a' — ориентировка зерен при насыпании сплошной струей; b и b' — при колебании их в плоской форме; a и b — диаграммы оптической ориентировки (изолинии: 1-2-3-4-5 >%, max = 6%); a' и b' — ориентировка тех же зерен по удлинению

Ориентировка зерен по удлинению (a') проявлена недостаточно отчетливо, оптическая ориентировка четкая (a). Узор диаграммы имеет два отчетливо выраженных взаимно перпендикулярных максимума, расположенных на периферии диаграммы.

При колебании насыпанного песка в форме ориентировка агрегата зерен меняется. Так, ориентировка по удлинению становится более наглядной (b'), так как намечается, хотя и слабо выраженная, ориентировка длинных осей зерен мелкодробленого кварца в направлении, субперпендикулярном направлению колебаний.

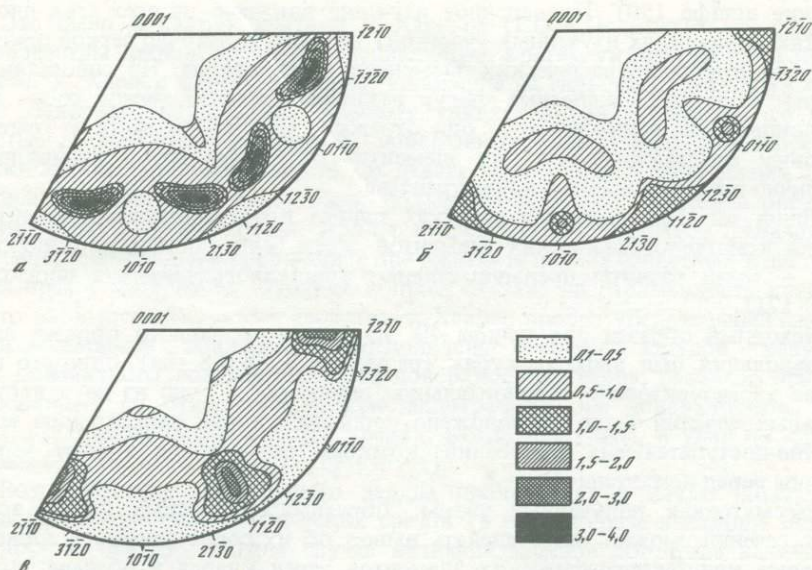
По сравнению с результатами проведенного ранее опыта (a) оптическая ориентировка более совершенна (b), узор диаграммы проще. Четко развит один максимум, в расположении второстепенных максимумов отмечается тенденция к пояскому расположению. Сопоставление обоих типов ориентировок зерен кварца (оптической и по удлинению) показывает, что прямой связи между ними нет.

Сопоставление результатов ранее проведенных опытов (фиг. 8) с результатами изучения агрегата зерен мелкодробленого кварца показы-



Ф и г. 7. Опыты с люберецким песком в цилиндрической форме

a-г - диаграммы оптической ориентировки зерен кварца. *a'-г'* - диаграммы ориентировки тех же зерен кварца по удлинению; *a-a'* и *б-б'* - суммарные диаграммы; *в-в'* и *г-г'* - обзорные, *д-д'* и *е-е'* - частные, *ж-ж'* и *з-з'* - местные. Положение изучаемых участков в пределах шлифа приведено на схемах в левом верхнем углу диаграмм (изолинии: 1-2-3-4-6-8-10 > %, max = 18%)



Фиг. 10. Результаты дифрактометрического изучения

"Обратные" полюсные фигуры, характеризующие ориентировку кристаллографических плоскостей зерен кварца рыхлого агрегата (при насыпании его через сито, фиг. 8, а); а-б — различные участки замеров (на одной плоскости); справа — шкала плотностей выхода нормалей (сравнительно с плотностью изотропного образца)

вает, что и в данном случае интенсивность проявления оптической ориентировки зерен также зависела от способа насыпания: при более интенсивном взаимодействии зерен кварца друг с другом наблюдалась тенденция к повышению степени совершенства оптической ориентировки зерен (узор диаграммы упрощается).

Результаты дифрактометрического изучения. Для уточнения полученных ранее результатов было впервые предпринято дифрактометрическое изучение ориентированного строения песков на примере рассмотренных выше образцов люберецкого песка (фиг. 8). В качестве объектов исследования были взяты: шлиф 150 (опыт, в котором песок просеивался через сито); исходный образец, из которого был приготовлен шлиф 150; шлиф 40 (опыт, в котором песок подвергался колебанию в форме); исходный образец для шлифа 40. Проведенное изучение пространственной ориентировки кристаллографических элементов зерен кварца указанных образцов показало следующее.

Шлиф 150. В пределах шлифа (открытого) изучалась ориентировка кристаллографических элементов зерен на трех близрасположенных участках. Оказалось, что ориентировка кристаллографических элементов зерен кварца агрегата на указанных участках различна. Судя по узору "обратной" полюсной фигуры, на одном участке преобладают кристаллографические плоскости $(2\bar{1}\bar{3}1)$ (фиг. 10, а), на соседнем участке — плоскости $(10\bar{1}1)$ и $(11\bar{2}0)$ (б), на третьем — плоскости $(11\bar{2}1)$ и $(11\bar{2}2)$ (в).

В исходном сцементированном образце для шлифа 150 исследовались три взаимно перпендикулярных сечения (одно из них — горизонтальное —

сечение шлифа 150). Проведенное изучение показало на всех трех плоскостях (в пределах изученных участков) наличие достаточно четкой ориентировки кристаллографических элементов зерен кварца. Но сопоставить узоры "обратных" полюсных фигур различных сечений между собой не представлялось возможным — они отражали четкую, но частную ориентировку кристаллографических элементов отдельных групп индивидов, различно ориентированных в пространстве.

Шлиф 40. На отдельных участках шлифа пространственная ориентировка кристаллографических элементов зерен была достаточно однородной — были развиты преимущественно кристаллографические плоскости $(11\bar{2}1)$.

Исходный образец для шлифа 40. Из сцементированного образца для исследования был вырезан кубик (размером $8 \times 8 \times 8$ мм), одно его сечение характеризовало горизонтальную плоскость, а одно из двух вертикальных сечений было расположено перпендикулярно направлению возвратно-поступательных колебаний, которым подвергался агрегат зерен кварца перед цементацией.

Рассматривая полученные узоры "обратных" полюсных фигур всех трех сечений, можно было сделать вывод об их сопоставимости. Ориентировка кристаллографических элементов зерен кварца в образце такова, что в сечениях, параллельных направлению колебаний, развиты в основном плоскости призм первого и второго рода, хотя в сечении, перпендикулярном направлению колебаний, ориентировка плоскостей $(21\bar{3}4)$ может указывать на неоднородную ориентировку оптических осей. В целом полученные данные позволяют считать, что пространственная ориентировка кристаллографических элементов зерен кварца в исследованном образце более совершенна (по сравнению с ранее рассмотренным случаем).

Некоторые выводы. В зависимости от способа насыпания песка изменяется оптическая ориентировка зерен кварца рыхлого агрегата (степень совершенства пространственной ориентировки отдельных групп зерен кварца в агрегате). При интенсивном колебании песка в плоской форме в развитии ориентированного строения агрегата наблюдается следующая тенденция: все группы зерен кварца приобретают достаточно однозначную пространственную ориентировку по внутреннему строению — наблюдается упорядочение ориентировки не только оптических осей, но и, что весьма важно, всех основных кристаллографических плоскостей зерен кварца, слагающих агрегат (данные дифрактометрического исследования).

В развитии ориентировки зерен по удлинению тенденция иная: ориентировка зерен кварца по удлинению ухудшается. Учитывая особенности структурообразования рыхлого агрегата зерен кварца, можно высказать предположение, что существует новый фактор, контролирующий возникновение и развитие ориентированного строения рыхлой осадочной породы. Возможно, что основная причина этого — электрическое взаимодействие зерен кварца друг с другом. Полагая, что в результате трения кварца о кварц (двух однотипных диэлектриков друг о друга!) на поверхности зерен должны возникать электрические заряды (причем не только значительной величины, но и различных знаков).

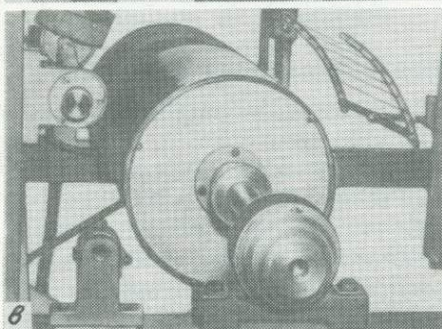
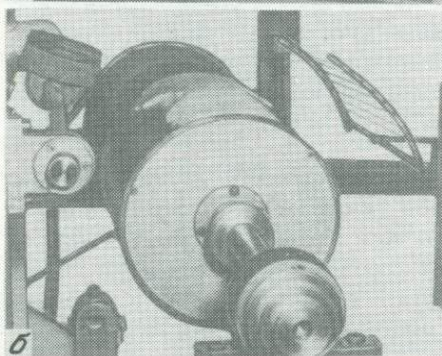
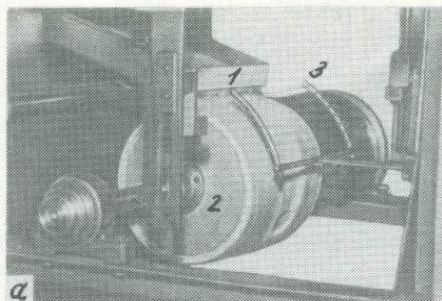
Это было доказано опытами У. Харпера [135]. Поскольку его опыты не известны широкому кругу специалистов, кратко укажем на их особенности. У. Харпер изучал факторы, влияющие на силы сцепления двух чистых поверхностей кварца. К своему удивлению, он установил, что две чистые и, казалось, однородные поверхности кварца (которые теоретически вообще не должны были бы давать заряд) при легком трении способны заряжать друг друга очень большими зарядами. Причем в определенных случаях возникали заряды непредсказуемо большой величины, больше, чем заряды, возникающие при контакте любых известных в настоящее время материалов. Уточняя вопрос, связана ли заряженность кварца с его пьезоэлектрическими свойствами, Харпер провел убедительный изящный эксперимент, показавший, что появление огромных зарядов — результат контактного воздействия двух поверхностей кварца, различно ориентированных по отношению к кристаллографическим поверхностям. Заряд появляется после легкого трения, когда нет удара, и удар на заряд не влияет (т.е. пьезоэффект отсутствует).

Возникновение наибольшего заряда проявляется в случае контакта различных кристаллографических срезов (в одном срезе выходила ось c , в другом ось a). В этом случае величина зарядов достигала величины $77,8 \cdot 10^{-4}$ E.S.U. Средний заряд для всех проведенных наблюдений составлял $4,36 \cdot 10^{-3}$ E.S.U. (при радиусе круга истинного контакта в условиях эксперимента $r = 5 \mu$). В направлении осей второго порядка всегда наблюдался заряд положительного знака.

Влияние электрического поля на ориентировку агрегата зерен кварца

Для уточнения возможной причины возникновения оптической ориентировки в агрегате зерен кварца песка проводились опыты в электрическом поле коронного сепаратора (работа коронных сепараторов основана на ионизации газов, находящихся под воздействием сильного электрического поля, создаваемого электродами [72 и др.]). В результате предварительных опытов (проведенных с люберецким песком) удалось подобрать режим, при котором на вращающемся барабане сепаратора осаждался слой зерен кварца достаточной толщины (фиг. 11). При вращении барабана (осадительного электрода) со скоростью 30–45 об/мин, величине разрядного промежутка до 20 мм (коронирующий электрод — ряд тонких параллельных проволочек), напряжении до 25 кВ и нагреве системы: бункер—питатель—барабан до 70–80°C удалось получить на вращающемся барабане слой зерен кварца мощностью до 15 мм (при сухой погоде).

Дальнейшее наращивание слоя песка на барабане обычно не происходит, так как наблюдается отрыв отдельных участков (фиг. 11, a). Поступающими порциями песка эти участки вновь залечиваются, но дальнейший рост слоя зерен кварца на барабане не отмечается. Отметим, что не все зерна осаждаются на барабан, часть их с него ссыпается вниз не осаждаясь. Наблюдаются случаи (реже), когда зерна кварца интенсивно отскакивают от барабана в сторону коронирующего электрода. При сепарации песка в поле коронного сепаратора поведение совокупности зерен кварца весьма напоминало поведение жидкости: зерна кварца, слипаясь, об-



Ф и г. 11. Ориентировка зерен кварца люберецкого песка в электрическом поле коронного сепаратора

1 — лоток питателя, 2 — барабан (осадительный электрод), 3 — коронирующий электрод. Пояснения в тексте

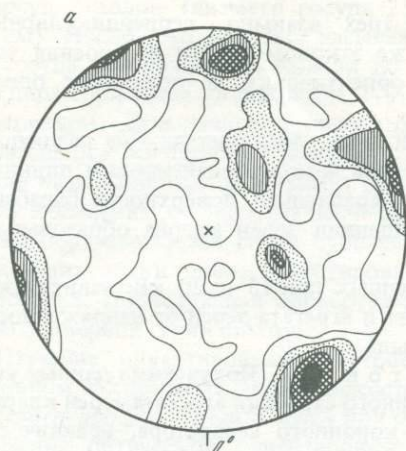
разуют подвижный агрегат, способный каплеобразно стекать с лотка питателя.

В ходе предварительных опытов было установлено, что при одновременной остановке барабана и снятии напряжения нижняя часть слоя песка падает. На верхней части барабана остается участок шириной около 150 мм. Он характеризуется резкими границами, обычно ориентированными перпендикулярно поверхности барабана. Затем зерна кварца в краевых частях слоя постепенно теряют заряд и осыпаются (фиг. 1, б). Но иногда должно пройти 3—4 часа (в сухую погоду), прежде чем ширина слоя песка в верхней части барабана достигнет примерно 30 мм и его положение на барабане будет ограничено устойчивой плоскостью, наклоненной к слою песка под углом естественного скоса (в). За это время можно цементировать агрегат зерен кварца в верхней части осадительного электрода.

Ниже приведены результаты изучения ориентировки зерен кварца в электрическом поле коронного сепаратора, полученные при различных напряжениях (за основу взяты результаты опыта при напряжении 25 кВ).

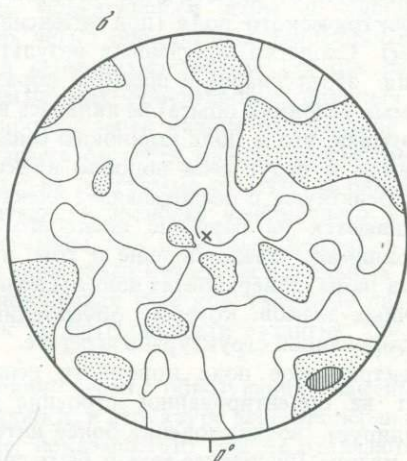
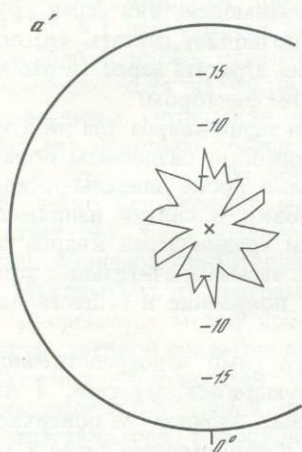
Вследствие значительной (до 15 мм) мощности слоя песка, осаждавшегося на барабан, в цементированном агрегате зерен кварца удалось изучить ориентировку зерен на трех взаимно перпендикулярных сечениях. Как обычно, рассмотрим более детально ориентировку на горизонтальной плоскости (в данном случае поверхность образца, повторяющего форму осадительного барабана, предварительно шлифовывалась).

Изучение узоров оптической ориентировки частных диаграмм показало, что они образованы отдельными четко выраженными максимумами, ориентированными в пространстве различно (плотность максимумов до 8%). Характер узора обзорной диаграммы предопределен узорами



Ф и г. 12. Ориентировка песка в электрическом поле коронного сепаратора. Горизонтальная плоскость образца

a и a' — обзорные диаграммы, b — общая диаграмма; a и b — диаграммы оптической ориентировки зерен кварца (изолинии: 1-2-3-4-5-6 > %, max = 12%); a' — ориентировка зерен кварца по удлинению



диаграмм частных (фиг. 12, a). Обзорная диаграмма оптической ориентировки зерен кварца на соседнем, отстоящем от рассмотренного участка на 5 мм, при общем построении узора имеет несколько меньшую интенсивность проявления максимумов, и их пространственное расположение несколько иное. На общей диаграмме оптической ориентировки зерен (составленной на основании 200 замеров зерен обоих участков обзорных диаграмм) четкость узора нивелируется. Плотность максимумов едва достигает 3% (b).

Изучение особенностей формирования отдельных максимумов узора диаграмм показывает, что нельзя наметить какие-либо индивидуальные черты ориентировки зерен, связанные исключительно с опытом в электрическом поле (они не отличаются от аналогичных изученных ранее особенностей).

Сопоставление результатов изучения ориентировки на трех взаимно перпендикулярных плоскостях показывает, что в целом диаграммы оп-

тической ориентировки зерен всех трех взаимно перпендикулярных сечений имеют примерно одни и те же закономерности построения узоров, но различия пространственной ориентировки не позволяют однозначно сопоставить их между собой.

Изучением диаграмм ориентировки зерен по удлинению на различных сечениях образца установлено отсутствие четкой ориентировки длинных осей зерен в одном направлении — параллельно поверхности барабана; можно говорить лишь об общей тенденции зерен кварца образовывать плотную упаковку (a').

В дополнительных опытах, проведенных при 15 и 20 кВ, зависимость интенсивности проявления ориентировки агрегата зерен от напряженности электрического поля установлена на была.

Обсуждение результатов [34]. Полученные данные указывают, что особенности ориентированного строения агрегата зерен кварца, возникшего в электрическом поле коронного сепаратора, практически не отличаются от аналогичных особенностей агрегата зерен кварца в опытах без электрического поля (при интенсивном взаимодействии зерен друг с другом). Сходство полученных результатов позволяет считать, что поляризация зерен кварца в процессе образования агрегата зерен (в рассматриваемых условиях опыта) не являлась ведущим фактором.

Учитывая, что в поле коронного сепаратора зерна кварца (на питателе) слипаются и ведут себя подобно вязкой жидкости, различным образом взаимодействуют с осадительным электродом, а также длительное время удерживаются на барабане после его остановки и снятия напряжений, мы принимаем представление о том, что при трении зерен кварца друг о друга на их поверхностях должны возникать весьма значительные заряды различных знаков, которые обуславливают появление и существование ориентированной структуры в агрегате.

Электрическое поле коронного сепаратора само непосредственно не влияет на ориентированное строение образующегося агрегата, а лишь стимулирует возникновение более интенсивных зарядов на поверхности зерен кварца (последнее может быть связано с деформацией зерен в электрическом поле), и это приводит к более интенсивному взаимодействию между зернами новообразующегося агрегата.

Представление об интенсивном взаимодействии зерен в процессе осаждения в поле сепаратора подтверждается ориентировкой длинных осей зерен типа "плотности упаковки", а также фактом относительно меньшей пористости сформированного в поле коронного сепаратора агрегата (порядка 40% против обычной пористости для рыхлого песка, сформированного в условиях спокойного осадконакопления, равной ~ 50%).

Ориентировка агрегата зерен кварца в водной среде

С целью выяснения возможности распространения полученных выводов на агрегаты зерен кварца, осаждающихся в водной среде, были дополнительно поставлены две серии опытов: в первой — люберецкий песок отлагался в спокойной водной среде, во второй — после отложения подвергался возвратно-поступательным колебаниям. Первую серию опытов проводили следующим образом. Песок засыпали тонкой сплошной струей

в сосуд с водой (диаметр сосуда 25 см, высота столба воды примерно 40 см). После того как был насыпан слой песка мощностью 10 см, воду из сосуда осторожно откачивали до тех пор, пока покрывающая осадок толщина слоя воды не достигала 2–3 см. Эта вода удалялась естественным испарением. Дальнейшее изучение ориентировки агрегата зерен кварца проводилось по принятой методике. Во второй серии опытов слой песка после насыпания был подвергнут вместе с сосудом возвратно-поступательному колебанию в горизонтальной плоскости. В результате на поверхности песка образовывалась серия субпараллельных холмиков и впадин, напоминающих знаки ряби, ориентированные перпендикулярно направлению колебаний. Последующая обработка материала не отличалась от обработки его в первой серии опытов.

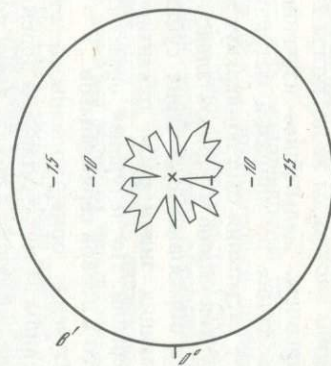
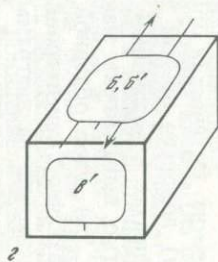
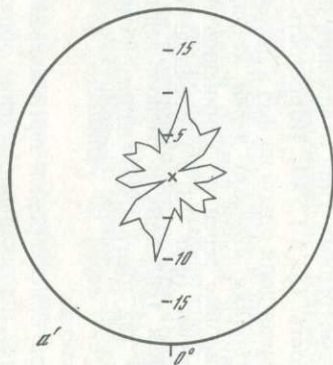
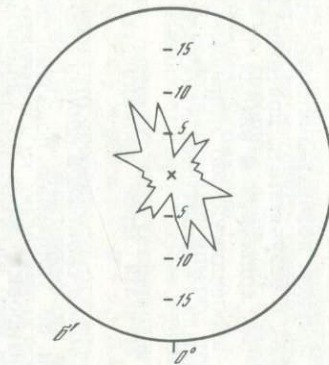
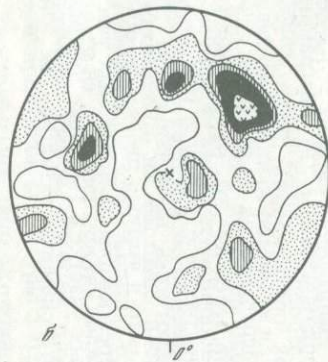
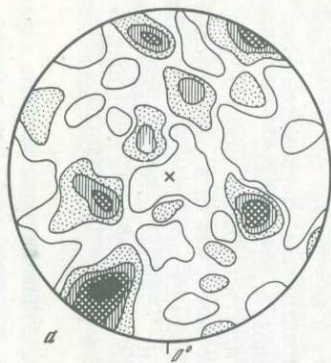
Изучение ориентированного строения агрегата зерен проводилось в основном на горизонтальной плоскости.

Ориентировка агрегата зерен при отложении в спокойной водной среде. Изучение оптической ориентировки зерен по удлинению показало следующее. На обзорной диаграмме ориентировки зерен по удлинению (фиг. 13, a') наблюдается не очень четко проявленная тенденция к расположению длинных осей зерен в субмеридиональном (на диаграмме) направлении, хотя на частных диаграммах ориентировка длинных осей была различна. Оптическая ориентировка зерен кварца на обзорной диаграмме (a) довольно обычна для агрегатов зерен кварца, рассмотренных ранее в опытах в воздушной среде: на диаграмме отмечается ряд достаточно четко выраженных максимумов (плотность наибольшего из них достигает 5%). Узор обзорной диаграммы, как и частных диаграмм, обусловлен различной ориентировкой групп зерен кварца на локальных участках. Максимумы на диаграммах локальных участков (местные диаграммы) различаются между собой как по интенсивности развития, так и по пространственной ориентировке.

Изучение особенностей положения зерен, образующих максимумы на диаграммах оптической ориентировки, в структуре агрегата зерен кварца, отлагавшегося в водной среде, показало, что они не отличаются от ранее рассмотренных (при отложении песка в воздушной среде), включая и пористость ($51 \pm 1,5\%$). Пористость определялась стереометрически — как объемная доля одной из фаз в двухфазном агрегате [84].

Ориентировка агрегата зерен кварца при колебании водной среды. В ориентировке зерен по удлинению намечается, как и в ранее рассмотренном случае (фиг. 13, a'), определенная, хотя и недостаточно отчетливо проявленная тенденция к расположению их длинных осей в субмеридиональном (на диаграмме) направлении (σ'). Интенсивность проявления ориентировки зерен по удлинению (в %) в обоих рассматриваемых случаях одинакова.

Изучение ориентировки зерен кварца по удлинению на плоскости, характеризующей вертикальное сечение образца, показало (σ'), что в процессе колебания удлиненные зерна кварца стремятся образовать более плотную упаковку (влияние "поверхности напластования" практически отсутствует). Пористость агрегата равна $45 \pm 2,1\%$. По сравнению с опытом 1 оптическая ориентировка зерен выражена более четко. На узоре диаграммы отмечается развитие одного большого максимума с плотностью более 7%.



A

B

В развитии второстепенных максимумов (их плотность в основном равна 3%) наблюдается тенденция к поясному расположению (диаграмма б).

В целом результаты изучения оптической ориентировки (и ориентировки по удлинению) агрегата зерен кварца, отлагающегося в колеблющейся водной среде, в рассматриваемых опытах весьма близки к результатам ранее проведенных опытов (фиг. 8) в воздушной среде.

В заключение отметим, что отлагающийся и в водных условиях агрегат зерен обладает структурными особенностями, которые не отличаются от ранее рассмотренных, сформированных в воздушной среде (включая и структурные признаки рыхлого агрегата, сформированного в электрическом поле коронного сепаратора).

Полученные данные позволяют считать, что выводы, сделанные при изучении ориентированных структур рыхлого агрегата зерен кварца в воздушной среде, могут быть распространены и на агрегаты зерен кварца, отлагавшиеся в водной среде.

Судить о степени проявления электрического взаимодействия зерен кварца в водной среде трудно, так как диэлектрическая постоянная дистиллированной воды в 80 раз больше, чем воздуха и, следовательно, электрическое взаимодействие зерен друг с другом должно было бы быть во столько же раз меньше. Но вопрос усложняется тем, что это взаимодействие зерен может проявляться в природных условиях значительно интенсивнее, так как природные воды — это не дистиллят, а электролиты (поскольку в них всегда присутствуют в виде растворов те или иные природные соединения). Кроме того, сама вода имеет вполне определенную структуру [8 и др.]. Если при этом еще учитывать, что электрическая неоднородность поверхности кварца, помимо трения, может быть связана (в водной среде) еще с несколькими механизмами: растворение (в неэквивалентных количествах), адсорбция ионов, адсорбция полярных молекул, возникновение поверхностных соединений, их диссоциация и другие, то необходимость постановки специальных исследований по выяснению электрического взаимодействия зерен кварца песка в водной среде в связи с выявлением особенностей пороодообразования становится очевидной.

СЕДИМЕНТАЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ ПРИРОДНЫХ КВАРЦЕВЫХ ПЕСКОВ

Изучение ориентированного строения природных песчаных пород проводилось на двух объектах — в коренном залегании, где агрегат зерен кварца не обладает четкими видимыми признаками перемещения, и в переотложенных современных отложениях, в которых у агрегата зерен имеются макроскопические видимые текстурные признаки движения. Для этой цели в районе г. Звенигорода на одном и том же участке (правый

Фиг. 13. Опыты с люберецким песком в водной среде

А — ориентировка зерен кварца, отлагавшегося в спокойной водной среде (горизонтальная плоскость); Б — ориентировка агрегата зерен кварца, возникающая при колебании его в водной среде; а и б — диаграммы оптической ориентировки зерен кварца (изолинии: 1-2-3-4-5 > %, max = 7%); а'-б' — диаграммы ориентировки тех же зерен по удлинению; з — схема образца с положением изучаемых участков

берег Москвы-реки) были отобраны образцы верхнеюрских существенно кварцевых песков: в коренном залегании и по дну небольших оврагов и промоин, расчленяющих данную толщу, из небольших конусов выноса, образовавшихся в результате современной деятельности дождевых вод.

Ориентированное строение песка в коренном залегании. Для исследования были взяты образцы из субгоризонтально залегающих слоев, представленных более или менее однородным кварцевым материалом.

Микроструктурное изучение. Из вертикальной стенки обнажения вынимался блок песка размером 20 X 20 X 20 см. Этот блок, будучи влажным, не рассыпался. После просушки (примерно в течение 1—2 суток) сплошность блока сохранялась. Свободолежащие песчинки с его верхней части осторожно сдувались. Песок в центральной части горизонтальной плоскости блока цементировался карбинольным клеем. Дальнейшая обработка производилась согласно принятой методике.

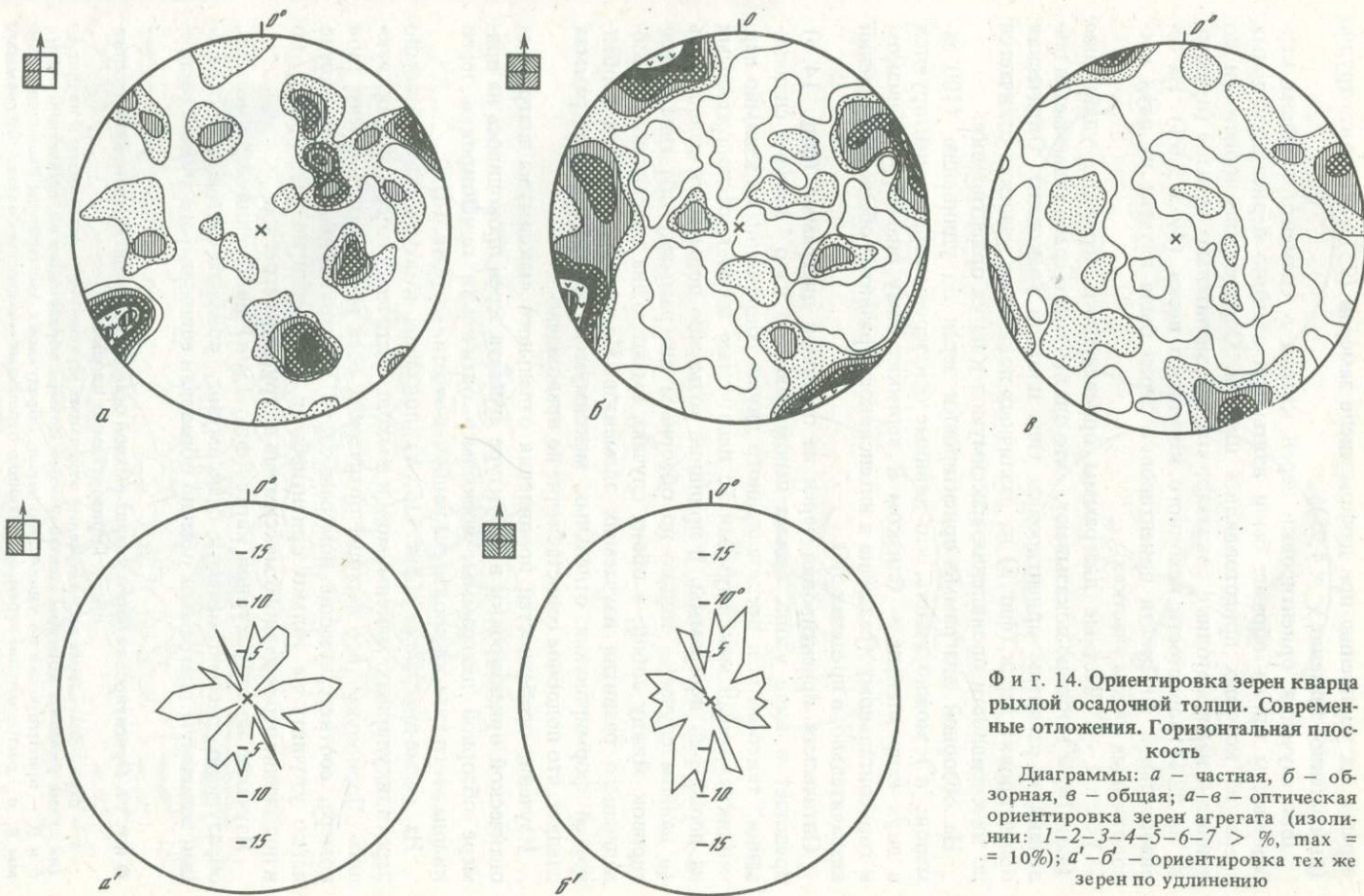
Изучаемый материал в шлифах под микроскопом представлен зернами кварца размерами 0,01—0,44 мм. Вместе с зернами кварца иногда встречаются отдельные зерна полевого шпата (несущие следы двойникования). Форма зерен кварца различная, чаще неправильная с острыми неокатанными гранями, образована комбинацией рациональных и иррациональных поверхностей ограничения. Практически во всех зернах устанавливается удлинение (отношение короткой оси к длинной до 1:4). Пористость агрегата $50,9 \pm 2,8\%$.

Связь между удлиненной формой зерен и положением их оптических осей при данном числе замеров (100) статистически, согласно принятой нами методике, не установлена (распределение рассматриваемых угловых величин равномерное). Изучение ориентировки агрегата зерен кварца рыхлой осадочной толщи проводилось на трех взаимно перпендикулярных плоскостях (местные, частные, обзорные, общая диаграмма).

Полученные результаты не отличаются от рассмотренных в условиях опытов. Общее представление об ориентировке песка рассматриваемого участка дают диаграммы фиг. 3.

Дифрактометрическое изучение. В сцементированном карбинольным клеем образце (размером 6 X 6 X 6 мм) проводилось изучение пространственной ориентировки кристаллографических элементов зерен кварца на трех взаимно перпендикулярных сечениях (одно из сечений параллельно плоскости напластования). Для каждого сечения устанавливается вполне четкая преимущественная ориентировка кристаллографических элементов индивидов агрегата. Сопоставлением узоров "обратных" полюсных фигур трех взаимно перпендикулярных сечений между собой установлено отсутствие однозначной пространственной ориентировки кристаллографических элементов зерен кварца в рассматриваемом образце.

Ориентированное строение песка в конусах выноса. Материал — неравномернозернистый агрегат, сложенный зернами кварца размерами в среднем 0,1—0,4 мм. Вместе с зернами кварца встречаются отдельные зерна полевого шпата. На структурной карте можно было видеть, что удлиненная форма зерен (судя по зернам кварца, у которых оптические оси лежат в горизонтальной плоскости) аналогична рассмотренной в предыдущем примере. Какую-либо систему в отношении простирания оптических осей



Ф и г. 14. Ориентировка зерен кварца
рыхлой осадочной толщи. Современные
отложения. Горизонтальная плос-
кость

Диаграммы: *a* – частная, *б* – об-
зорная, *в* – общая; *a*–*в* – оптическая
ориентировка зерен агрегата (изоли-
нии: 1–2–3–4–5–6–7 > %, max =
= 10%); *a'*–*б'* – ориентировка тех же
зерен по удлинению

зерен к их удлинению при данном числе замеров (95) установить трудно (вычисленное значение $\chi^2 = 4,95$).

Для изучения ориентировки зерен кварца в сцементированном карбинольном клеом образце были взяты три взаимно перпендикулярных среза, из которых готовились шлифы. Определение пористости по принятой нами методике показало, что она значительно меньше (примерно на 22%) пористости исходного коренного песка ($39 \pm 2,6\%$). На горизонтальной плоскости ориентировка зерен была изучена на двух расположенных рядом участках.

Участок 1. Частные диаграммы ориентировки зерен по удлинению (фиг. 14, *a'*) обычно показывают, что она выражена слабо (намечается тенденция к развитию ориентировки типа плотной упаковки). Оптическая ориентировка зерен (фиг. *a*) на различных локальных участках отличается по интенсивности проявления максимумов и по их ориентировке.

На обзорной диаграмме ориентировки зерен по удлинению (100 замеров; *a'*) можно видеть, что длинные оси зерен кварца ориентируются в двух направлениях — близком к вертикальному диаметру и близком к горизонтальному (различие в интенсивности развития обоих направлений незначительно, в пределах 5%).

Оптическая ориентировка зерен на обзорной диаграмме (фиг. 14, *b*) предстает в виде узора, весьма напоминающего узор "фигуры сплющивания" тектонитов и представленного двумя сопряженными взаимно перпендикулярными максимумами (с плотностью до 8%), расположенными на периферии диаграммы. В принципе возможно попытаться сопоставить (в данном случае — только по обзорным диаграммам) оба типа ориентировок между собой: в обоих случаях имеются два направления преобладающего развития изучаемых элементов. Но из рассмотрения особенностей формирования отдельных максимумов на частных диаграммах следует, что подобное сопоставление не правомочно.

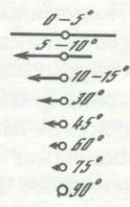
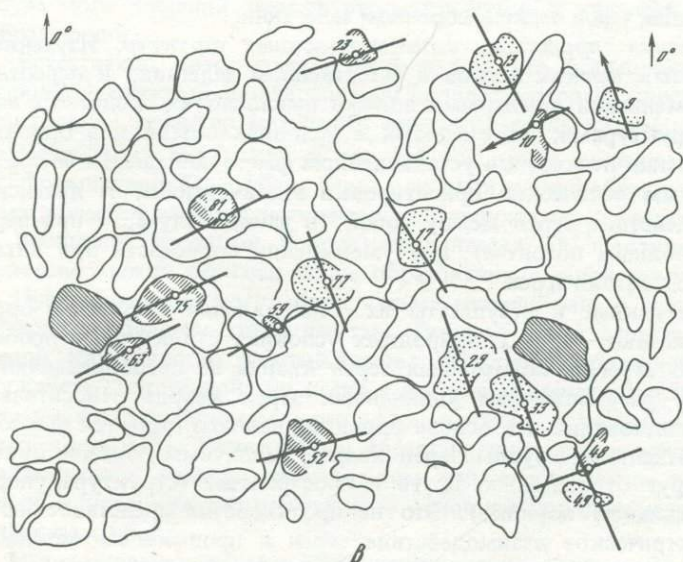
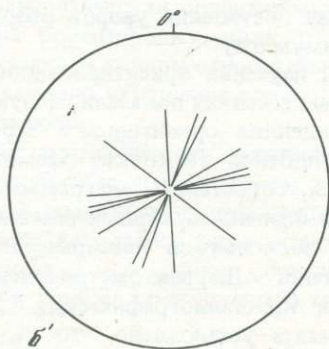
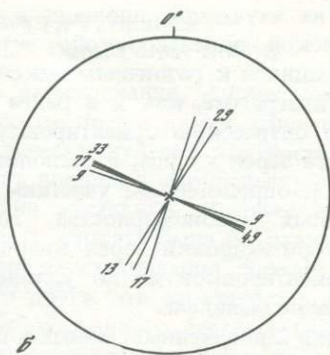
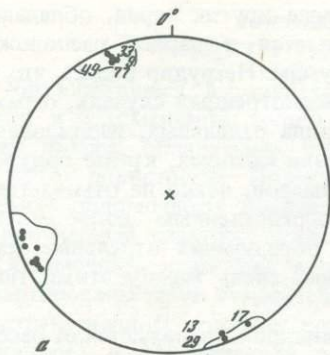
Изучение особенностей проявления отдельного максимума диаграммы оптической ориентировки в структуре агрегата зерен проводилось на примере обзорной диаграммы, поскольку оптическая ориентировка зерен кварца этого участка проявлена наиболее отчетливо (фиг. 14, *b*).

На схеме-диаграмме (фиг. 15, *a*) показаны контуры двух взаимно перпендикулярных максимумов и выходы оптических осей, их образующих. Поскольку все выходы оптических осей максимумов имеют свои номера, соответствующие номерам зерен на структурной карте, можно легко уточнить не только ориентировку этих зерен по удлинению, но и положение зерен данного максимума в структуре агрегата.

Изучение по структурной карте (фиг. 15, *в*) положения зерен кварца, образующих рассматриваемые максимумы, показало следующее: отдельный максимум диаграммы обычно образован единичными зернами, распе-

Ф и г. 15. Ориентировка зерен кварца рыхлой осадочной толщи. Современные отложения. Горизонтальная плоскость

a — схема-диаграмма расположения отдельных максимумов диаграммы *b* на фиг. 14 (на схеме указаны контуры максимумов и номера образующих их оптических осей); *b* и *b'* — ориентировка по удлинению зерен, образующих максимумы схемы-диаграммы *a*; *в* — расположение зерен, образующих отдельные максимумы схемы-диаграммы *a* (выделены различной штриховкой) в структуре агрегата зерен



B

деленными на изучаемой площади в массе других зерен, обладающих иной оптической ориентировкой; встречается и парное расположение зерен, относящихся к различным максимумам. Нетрудно видеть, что максимумы на диаграмме, как и в ранее рассмотренных случаях, отражают однозначную оптическую ориентировку ряда отдельных, изолированных друг от друга зерен кварца, в расположении которых, кроме приуроченности зерен к определенным участкам замеров, четко не отмечается каких-либо иных закономерностей. Непосредственным сопоставлением оптической ориентировки зерен кварца, образующих отдельные максимумы, с ориентировкой их по удлинению, связь между этими типами ориентировок не выявлена.

Для участка 2 полученные данные в принципе не отличаются от рассмотренных для участка 1. Оптическая ориентировка зерен кварца на общей диаграмме, построенной на замерах обоих участков (фиг. 14, в), вследствие сходства построения узоров обзорных диаграмм достаточно отчетливая (максимум 6%).

Результаты изучения ориентированного строения на трех взаимно перпендикулярных сечениях показали следующее.

Общая тенденция ориентировки зерен по удлинению заключается в образовании плотной упаковки. Несмотря на сходство построения узоров диаграмм, сопоставить диаграммы оптической ориентировки зерен трех взаимно перпендикулярных сечений между собой не представляется возможным, поскольку в пространстве максимумы диаграмм ориентированы различно. Дифрактометрическим изучением пространственной ориентировки кристаллографических элементов зерен кварца данного рыхлого агрегата установлено, что узоры "обратных" полюсных фигур фиксируют на всех трех сечениях четкую ориентировку кристаллографических элементов, слагающих агрегат зерен кварца. Пространственная ориентировка кристаллографических элементов зерен кварца агрегата более совершенна, чем в песке в коренном залегании.

Итоги изучения природных седиментационных структур. Изучением структур рыхлых юрских песков в естественном залегании и переотложенных современными дождевыми водами выявлено их сходство с аналогичными структурами, полученными в условиях опыта: и в ориентированном строении песков, и в установленном факте повышения четкости узоров диаграмм оптической ориентировки в зависимости от интенсивности взаимодействия зерен между собой (в данном случае — при перемещении их водным потоком), и в уменьшении пористости при интенсивном взаимодействии зерен.

Полученные данные и результаты их сопоставления достаточно определенно показывают, что и в природных условиях структурные особенности рыхлого агрегата обломочных зерен кварца не предопределяются закономерным расположением удлинённых зерен кварца относительно плоскости напластования и в основе ориентированного строения рыхлого песка лежат отдельные группы зерен кварца, различным образом ориентированные друг относительно друга в пространстве (структура, упорядоченная в ближнем порядке). Это не противоречит представлению о том, что электрическое взаимодействие зерен в процессе седиментации может рассматриваться как основной порообразующий фактор.

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕЗИСА СТРУКТУР РЫХЛЫХ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

Образовавшиеся в результате выветривания, физической транспортировки и седиментации толщи песков представляют агрегат обломочных зерен кварца, обладающих практически нулевой плотностью и большой (~ 50%) пористостью. Пористость породы предопределяется удлинённой формой обломочного кварца; для идеальных сферических частиц при наиплотнейшей упаковке пористость агрегата была бы равна ~ 26% [96].

Обломочные зерна уже в процессе становления породы закономерно ориентированы друг относительно друга, что отразилось в определенном пространственном строении новообразованного агрегата (в кластической структуре) и определенной пространственной ориентировке слагающих породу индивидов, характеризующейся ближним порядком. Последний проявляется в том, что отчетливая оптическая ориентировка наблюдается на диаграммах, характеризующих ориентировку лишь отдельных групп зерен (25–50). В пространстве указанные группы относительно друг друга ориентированы различно, чем и вызвано ухудшение степени совершенства диаграмм при увеличении числа замеров.

Приведенные опыты позволяют автору считать электрическое взаимодействие зерен основным породообразующим фактором в условиях седиментации как в водной, так и в воздушной среде. Указанное электрическое взаимодействие предопределяет становление осадочной породы как таковой в условиях седиментации и сохраняет образовавшуюся породу как целостное образование в ходе ее последующего геологического развития.

Поскольку взаимодействием электрических зарядов определяется пространственная ориентировка зерен в агрегате, указанный породообразующий фактор в условиях седиментации в зависимости от аспекта изучаемого явления может рассматриваться и как фактор структурообразующий.

Естественно, автор отдает отчет в том, что формирование осадочной породы — сложный многоплановый процесс, который определяют многие факторы — характер материала, динамика среды седиментации, условия формирования отложений и т.д. Но все они в конечном итоге влияют на формирующийся осадок через основной породообразующий фактор — электрическое взаимодействие соосаждающихся зерен кварца.

Возникает законный вопрос: сохраняется ли электрическое взаимодействие между зёрнами после образования рыхлой осадочной породы?

Предположения могут быть весьма различными, и здесь лучше обратиться к общеизвестным фактам. Смочим сухой агрегат зерен кварца водой. Как известно, рыхлый агрегат приобретает определенную вязкость, прочность. Такое свойство песка в настоящее время объясняется электрическим взаимодействием зерен; это — основа объяснения модели влажного песка [45]. Приведенные представления крайне важны, поскольку подтверждают выводы автора о том, что электрическое взаимодействие зерен в условиях седиментации — основной породообразующий фактор кварцевых пород.

Наличие электрического взаимодействия и между частицами глинистых

минералов (модель влажной глины [45]) позволяет считать, что выскаянное представление об электрическом взаимодействии между осаждающимися частицами как об основном пороодообразующем факторе в условиях седиментации не ограничивается кварцевыми породами и имеет, по-видимому, общегеологическое значение. Можно надеяться, что развитие электрогеохимии [99] позволит в дальнейшем разобраться в особенностях механизма явления.

В целом установление пороодообразующего фактора — электрического взаимодействия соосаждающихся зерен в процессе седиментации — представляется весьма важным шагом в познании генезиса осадочных пород, поскольку с помощью этого фактора могут быть объяснены: способность обломочных зерен кварца в условиях седиментации к самонакоплению (образование осадочной породы), а также к подводной или наземной миграции сформированной породы; пьезозффект осадочных песчаных пород — явление до сих пор не имевшее убедительного объяснения [16]; природа коллекторских свойств горных пород, открывающая реальный путь к научно обоснованному увеличению нефтеотдачи коллекторов; закономерная концентрация ряда рудных минералов (медь, золото, уран и др.) в пределах осадочных толщ; песчаная порода в двух последних случаях, согласно полученным данным, должна рассматриваться как своеобразный электрический фильтр, параметры которого меняются в зависимости от внешних условий.

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛИТИФИЦИРОВАННЫХ КВАРЦЕВЫХ ПОРОД

Сформированные пески в ходе геологического развития породы оказываются погребенными под толщей последующих отложений; погружение может идти до основания земной коры — до глубины порядка 30 км [96]. При погружении сформированный существенно кварцевый осадок подвергается интенсивному сжатию и воздействию температур. Вследствие указанного воздействия толща песков претерпевает изменения. Исходный высокопористый, содержащий межзеренный флюид рыхлый агрегат обломочных зерен в результате закрытия исходной пористости (до 50%), удаления флюида и увеличивающейся прочности сцепления зерен превращается в плотный, практически лишенный пористости песчаник.

Указанные преобразования могут, в общем случае, идти двумя различными путями, которые и рассматриваются.

Структуры пород, связанных с процессами цементации

При цементации пустоты между зернами рыхлого агрегата либо выполняются привнесенными, не характерными для исходных кварцевых пород минералами, либо цементация агрегата зерен кварца происходит за счет минералов, имеющих такой же химический состав (опал, халцедон, новообразованный мелкозернистый кварц). В указанных случаях отнесение рассматриваемых пород к первично-осадочным не вызывает затруднений.

Для уточнения структурных особенностей этого типа песчаных пород изучались два образца: верхнемеловой слабосцементированный глауконит-кварцевый песчаник одного из североуральских марганцевых место-

рождений [107] и нижнетретичный плотный кремнистый кварцитовидный песчаник с опаловым цементом [55].

В рассмотренных примерах новым по сравнению с ранее приведенными примерами рыхлых осадочных пород является следующее: более интенсивное проявление внутризеренных нарушений — деформационных полосок (особенно в песчанике с опаловым цементом); закономерное удлинение зерен агрегата (это не связано с заметным изменением обычной для осадочных пород слабо выраженной оптической ориентировки зерен); закономерная ориентировка длинных осей зерен относительно оптических осей под углом $15-25^\circ$; для песчаника с опаловым цементом величина $\chi^2 = 20,8$ всего при 69 замерах!

Особенности формирования структур кварцитовидных песчаников

В данном разделе рассматриваются породы, состоящие на 95% и более из обломочных зерен кварца, плотно сочлененных друг с другом. Породы этого типа (кварцитовидные песчаники, кварцито-песчаники) распространены по всему миру, имеют весьма различный возраст и составляют примерно 1/3 всех песчаников [74].

Большинство исследователей придерживается представления о том, что ведущим процессом в превращении осадочной породы в литифицированную в данном случае является растворение под давлением [74] — универсальный процесс, позволяющий одновременно объяснить источник растворимого кремнезема, интерпретировать взаимные прорастания кварцевых зерен, объяснить причины практически полного закрытия пор (50% и более) в исходных рыхлых осадочных породах.

Исследователи, изучающие поведение флюида в земной коре [96], отдают предпочтение представлениям о значительной роли деформации исходного материала в процессе литификации. Автором было предпринято исследование явления литификации на примере кварцитовидных песчаников Карелии (Шокшинские песчаники) и УССР (толкачевские кварцитовидные песчаники). В ходе исследования рассматривались три сложные проблемы, предопределяющие развитие пластической деформации осадочной породы, межзеренных структур растворения под давлением и межзеренных регенерационных структур.

Деформационные структуры

Шокшинский кварцитовидный песчаник. Геологическое строение района следующее. На размытой поверхности дислоцированных архейских осадочно-вулканогенных пород с резким стратиграфическим несогласием залегают породы протерозоя (нижний протерозой — карелий, верхний протерозой — иотний). Верхний протерозой представлен кварцитовидными песчаниками, диабазами и гранитами рапакиви. Кварцитовидные песчаники иотния развиты только в юго-восточном углу Карелии на юго-западном берегу Онежского озера. Иотнийские породы слагают пологую, вытянутую с северо-запада на юго-восток синклиналиную структуру [87 и др.], осложненную в ряде мест мелкими брахисинклиналиными и брахиантиклинальными складками, а также разрывными нарушениями. Толща иотнийских пород прорвана силами габбро-диабазов.

В нижней своей части кварцитовидные песчаники ютния представлены серыми и буроватыми разностями, вверх по разрезу постепенно переходящими в более однородные красные мелкозернистые мономинеральные кварцитовидные песчаники ("шокшинские кварциты") [93]. Эти породы выходят на поверхность в районе Шокшинского полуострова, где хорошо обнажены в рабочих карьерах.

Макроскопически шокшинские кварцитовидные песчаники представляют собой массивные мелко- и среднезернистые породы преимущественно сливные, окрашенные в малиновые, красновато-коричневые и розовые тона. Состав кварцитовидных песчаников выдержан по площади и разрезу; по данным химических анализов содержание SiO_2 достигает 98%. Пористость 0,23%, объемный вес 2,66.

Исследованные в шлифах под микроскопом образцы кварцитовидных песчаников в основном обладали гранобластовой структурой и были представлены совокупностью более или менее изометричных зерен, плотно примыкающих друг к другу. Форма зерен различная — от округлых до удлиненных, несколько уплощенных в одном направлении. Размеры зерен 0,1–0,5 мм. Границы между плотно прилегающими зернами четкие; они могут быть изогнутыми, волнистыми, но всегда отчетливо видны благодаря наличию окислов железа (гематит). Обычные для зерен агрегата признаки пластической деформации: аномальное угасание зерен (волнистое, полосчатое), извилистые границы зерен. В зернах породы отмечаются внутривершинные деформационные полоски; последние относительно оптических осей могут быть ориентированы различно (15–20, ~50, 60–70° [87]). В незначительном количестве (до 3%) встречаются чешуйки пиррофиллита [93], отдельные зерна халцедона, магнетита, титаномагнетита, цоизита, турмалина, циркона [87].

Весьма интересным, нехарактерным для осадочных пород представляет наличие элементов отчетливой межзеренной пластической деформации. Они проявляются в форме "вдавливаний" одного зерна в другое, подчеркиваемых иногда "ореолами напряжений" и веерообразно расходящейся мелкой трещиноватостью.

Наиболее примечательно следующее: одно зерно — "деформирующее" (типа зерен 2, 5 и 8 на фиг. 16) практически сохраняет свою форму, а другое — "деформируемое" испытывает весьма интенсивную пластическую деформацию (типа зерен 1, 6 и 10). Пластическая деформация в данном случае проявляется не только в формоизменении зерен, но и в изменении пространственной ориентировки их оптических осей.

Подобные примеры отчетливо показывают, что контактирующие зерна обладали различными физико-механическими свойствами. Сказанное подтверждается следующим: интенсивная пластическая деформация кварцевых зерен наблюдается только на отдельных участках зерна, в контакте с отдельными соседними зернами, в то время как другие участки контакта этого же зерна с другими соседними зернами признаков интенсивной пластической деформации не имеют.

Результаты предпринятой попытки выяснить "аномальное" поведение зерен кварца при развитии межзеренных деформационных структур показали, что предопределяющим фактором является ориентировка кристаллических решеток индивидов относительно друг друга. Наиболее интенсив-

но пластическая деформация проявляется тогда, когда в контактирующих зернах оптические оси ориентированы относительно друг друга различно. По-видимому, как и при развитии микродеформационных структур, это может быть связано с аннизотропией упругих свойств кварца (б).

Встречаемые на участках проявления пластической деформации (типа участка, отмеченного на фиг. 16 стрелкой) регенерационные оторочки выполняют преимущественно сложные контуры пустот между деформированными зонами; сами оторочки признаков деформации обычно не имеют.

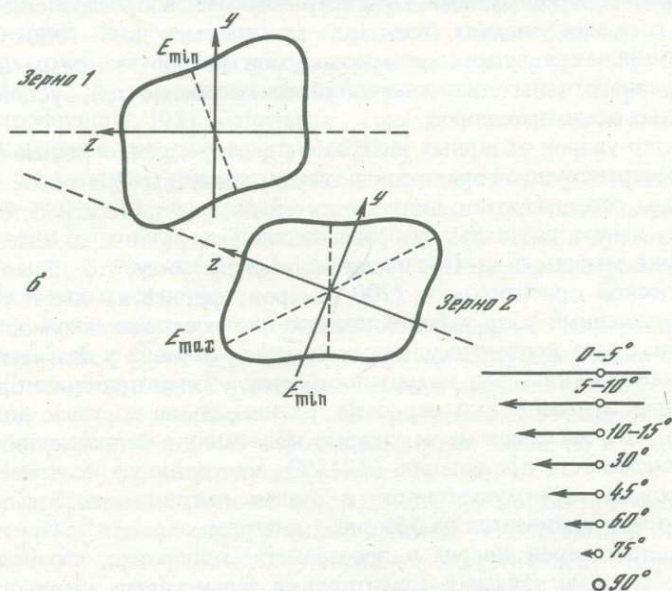
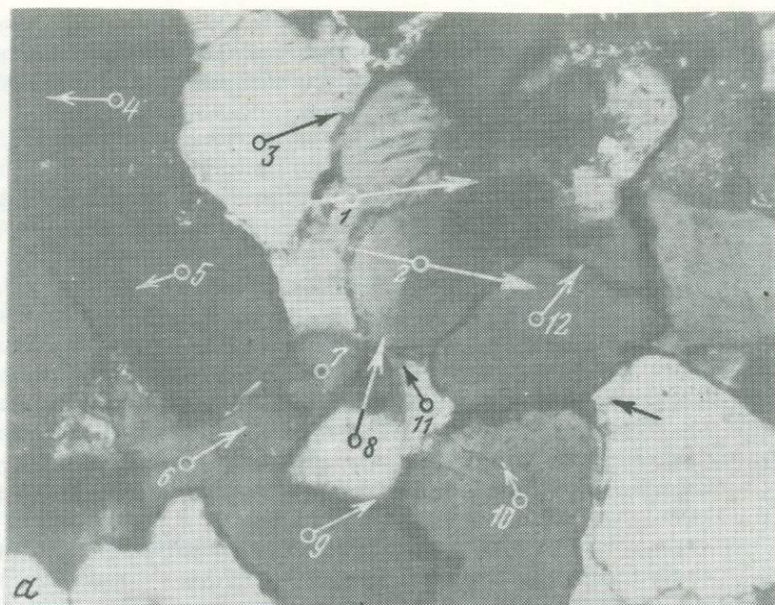
Проведенное изучение морфологических признаков пород с элементами пластической деформации показало следующее (фиг. 17): границы зерен кварца в основном криволинейны, только 40% границ прямолинейны; форма зерен в плоских сечениях преимущественно четырех- и пятиугольная; кривая распределения двугранных углов не соответствует теоретической равновесной кривой. Максимум кривой при 120° , равный 14%, как и наличие дополнительных максимумов при 70 и 180° , усиливает отличительные признаки данной кривой от аналогичной кривой равновесной гранобластовой структуры (фиг. 1).

Результаты изучения оптической ориентировки и ориентировки длинных осей зерен кварцитовидного песчаника показывают, что частные диаграммы оптической ориентировки (50 замеров) образованы отдельными четко выраженными максимумами, ориентированными в пространстве различно даже на соседних участках (плотность максимумов до 8–10%). Особенности формирования отдельных максимумов узоров диаграмм не отличаются от аналогичных изученных ранее особенностей, установленных для рыхлых осадочных пород.

Характер узоров обзорных диаграмм предопределен степенью совершенства и пространственной ориентировкой узоров частных диаграмм. Обзорные диаграммы, соседних, отстоящих относительно друг друга на расстоянии 5 мм участков, имеют различные узоры и несколько различную интенсивность проявления максимумов. Последнее приводит к тому, что общая диаграмма оптической ориентировки (200 замеров; фиг. 18, в) имеет еще более слабо выраженный узор и более низкую плотность максимумов (до 5%). На трех взаимно перпендикулярных сечениях образца у диаграмм оптической ориентировки зерен кварца построение узоров примерно одинаково.

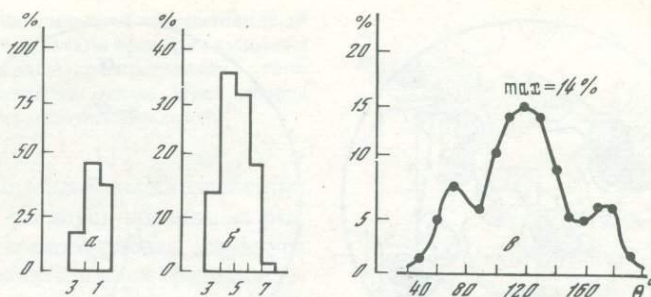
Изучение ориентировки зерен по удлинению на частных диаграммах показало, что, несмотря на некоторые колебания в направлении и различную интенсивность проявления (7–15%), все длинные оси зерен кварца ориентированы преимущественно в одном направлении. Эта тенденция отчетливо прослеживается на обзорных диаграммах (a' и b'). Ориентировка длинных осей зерен кварца в пространстве однородна, что подтверждается результатами изучения ориентировки зерен кварца по удлинению на трех взаимно перпендикулярных сечениях. Упорядоченность ориентировки зерен по удлинению в пространстве — признак, характерный не для всех плотных осадочных пород.

Изучение углов между удлинением зерен и положением их оптических осей, проведенное на основе методики "угловых соотношений", показало (фиг. 19), что длинные оси зерен кварца породы ориентированы под углом 10 – 20° (в среднем $\sim 15^\circ$) к оптической оси зерна. Напомним, что подоб-



Ф и г. 16. Кварцитовидный песчаник. Элементы пластической деформации. Увел. 100, николи скрещены

a — структурная карточка; стрелки — оптические оси зерен кварца (масштаб их воздымания относительно плоскости шлифа приведен в правой части снимка); большая стрелка справа внизу указывает на участок регенерационной оторочки, развивающийся между деформированными зернами; *b* — схема взаимной ориентировки сечений zy указательных поверхностей модуля Юнга зерен 1 и 2



Ф и г. 17. Шокшинский кварцитовидный песчаник. Характеристика структуры на основании результатов изучения морфологических признаков

a — гистограмма степени кривизны границ зерен; *b* — гистограмма форм зерен, наблюдаемых в шлифе; *c* — кривая распределения двугранных углов

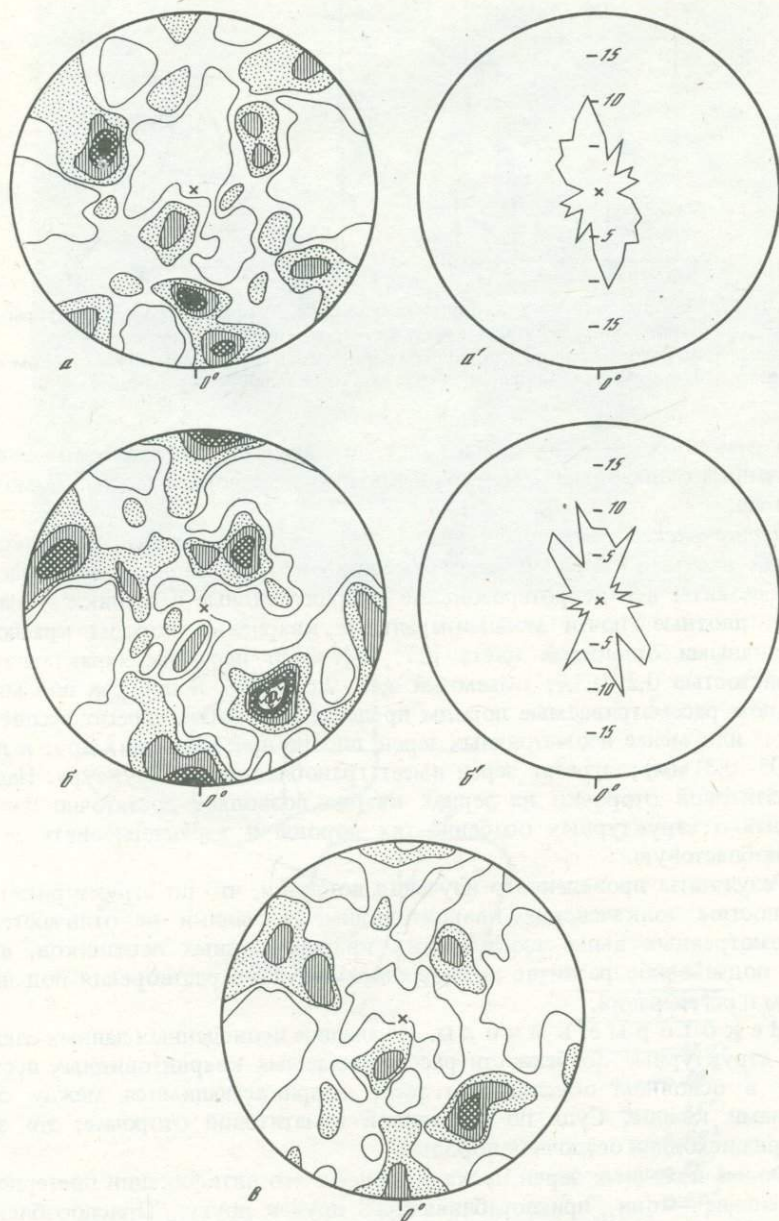
ная ориентировка отмечалась ранее, при рассмотрении кварцитовидного песчаника с опаловым цементом и при изучении формы зерен обломочного кварца.

Толкачевский кварцитовидный песчаник (УССР). Образцы для исследований взяты в северной части Украинского кристаллического массива, где развиты верхнепротерозойские кварцитовидные песчаники — массивные, плотные, почти мономинеральные кварцевые породы красного с различными оттенками цвета [27, 47]. Этот песчаник характеризуется пористостью 0,2–0,3%; объемный вес 2,64–2,66. В шлифах под микроскопом рассматриваемые породы представляют собой агрегат бесцветных более или менее изометричных зерен, плотно примыкающих друг к другу (0,05–0,3 мм); агрегат зерен имеет гранобластовую структуру. Наличие гематитовой оторочки на зернах кварца позволяет достаточно надежно судить о структурных особенностях породы и характеризовать ее как гранобластовую.

Результаты проведенного изучения показали, что по структурным особенностям толкачевские кварцитовидные песчаники не отличаются от рассмотренных выше шокшинских кварцитовидных песчаников, включая подчиненное развитие межзеренных структур растворения под давлением и регенерации.

Некоторые выводы. Из анализа приведенных данных следует, что структурные особенности рассматриваемых кварцитовидных песчаников в основном обусловлены тесно соприкасающимися между собой зернами кварца. Судя по отчетливой гематитовой оторочке, это зерна кварца исходной осадочной породы.

Форма исходных зерен песка в процессе его литификации претерпевала изменение — они "приспосабливались" друг к другу. "Приспособление", выразившееся в формоизменении зерен, на основе приведенных данных рассматривается как проявление пластической деформации. В ходе ее развития не только уменьшается (примерно на 50%) объем исходного осадка, но и возникает связанная сетка граничных поверхностей во всем объеме новообразующей плотной породы. Исходная кластическая структура рыхлой породы преобразуется в типичную для кварцитопесчаника структуру — гранобластовую [75].



Ф и г. 18. Шокшинский кварцитовидный песчаник

a и *b* — обзорные диаграммы, *v* — общая диаграмма ориентировки зерен кварца;
a—*v* — диаграммы оптической ориентировки зерен (изолинии: 1—2—3—4—5 > %, max = 8%); *a'* и *b'* — диаграммы ориентировки тех же зерен кварца по удлинению

Фиг. 19. Шокшинский кварцитовидный песчаник. Результаты проверки гипотезы о равномерном распределении углов между длинными осями зерен кварца и их оптическими осями

При интенсивном воздействии внешних факторов возникшая равновесная гранобластовая структура может сменяться иной гранобластовой структурой — зубчатой; физический смысл существующих в определителях [75 и др.] различных типов гранобластовых структур не ясен. Установлена законо-

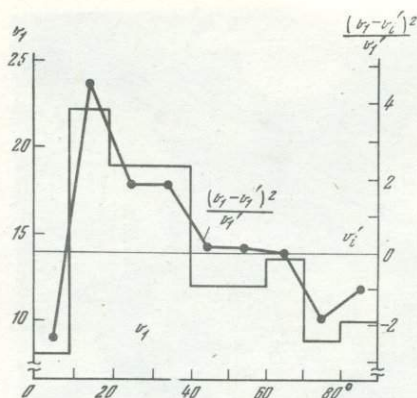
мерная связь формоизменения зерен с ориентировкой их оптических осей — зерна удлиняются статистически закономерно под углом $15-20^\circ$ к оптической оси. Установленное соотношение дает основание считать, что наблюдаемая пластическая деформация упруго-анизотропных зерен исходной породы в процессе литификации, как и при развитии внутризеренных нарушений, предопределяется особенностями реакции кристаллической структуры индивида на внешнее воздействие, реакцией, контролируемой анизотропией его упругих свойств. Пластическая деформация индивидов может быть представлена как трансляция в направлении под углом $15-25^\circ$ к оптической оси зерна или в направлении, перпендикулярном E_{\min} (фиг. 4).

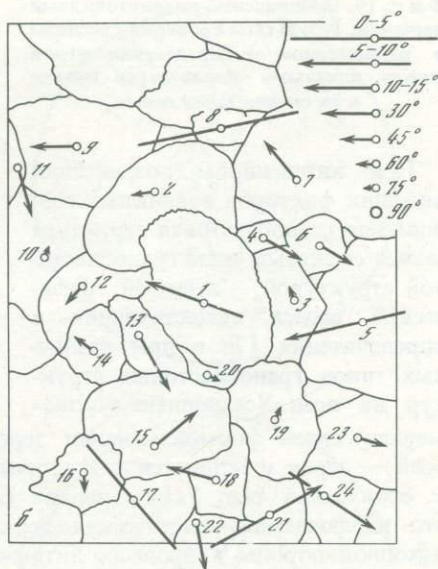
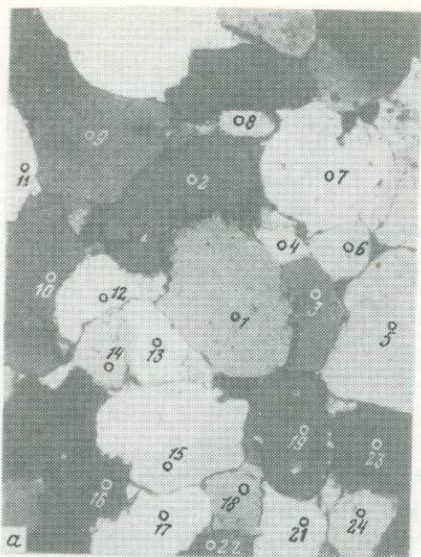
При увеличении параметров внешнего воздействия наблюдаются элементы более интенсивного проявления процесса пластической деформации в форме межзеренных деформационных структур (фиг. 16). Этот тип деформации отражает пространственную переориентировку кристаллической решетки зерна. Тот факт, что из двух соседних зерен одно — более компетентное и вызывает пластическую деформацию второго, однозначно подтверждает представление автора о том, что анизотропия упругих свойств соседствующих зерен, $P-T$ условия и внешнее воздействие определяют различие физико-химических свойств контактирующих индивидов агрегата.

Структуры растворения под давлением

Изучение явления растворения под давлением началось с середины прошлого века. В настоящее время это представляется комплексной проблемой, решение которой неоднозначно даже в самых общих положениях, несмотря на изучение природных объектов и результаты экспериментального изучения [73, 155 и др.]. Как уже указывалось, в рассматриваемых кварцитовидных песчаниках межзеренные структуры растворения под давлением имеют подчиненное значение, что, по-видимому, характерно для этих пород.

В шокшинских кварцитовидных песчаниках, согласно определениями И.М. Симановича [86], — подсчеты путем реконструкции вероятных кон-





Ф и г. 20. Структуры растворения под давлением на контактах зерен кварца шокшинского кварцитовидного песчаника

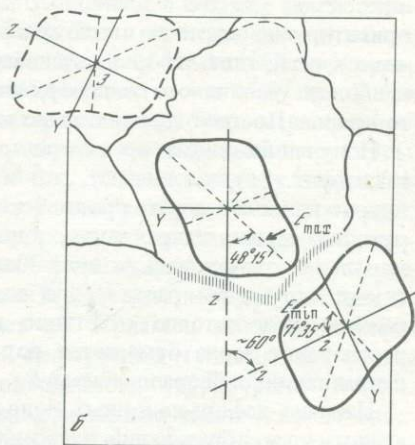
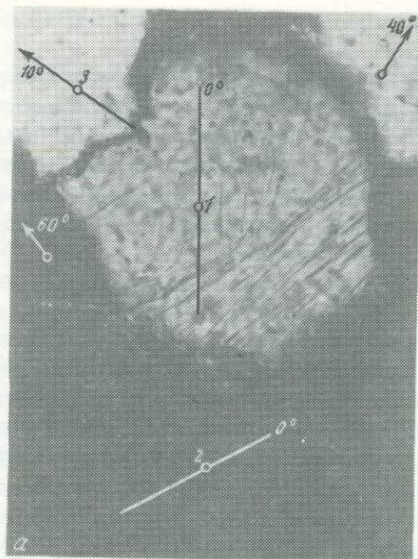
a — общий вид изучаемого участка породы в шлифе под микроскопом; увел. 100, николи скрещены; *б* — структурная карточка участка *a*. Цифры в зернах — порядковые номера замеров. Стрелки — ориентировка оптических осей. В верхней части рисунка — масштаб наклона оптических осей в плоскости шлифа

туров обломочных зерен, соприкасающихся по конформным поверхностям, — межзеренные структуры растворения под давлением составляют 10–15% от объема пород.

Изучением развитых между зернами кварца структур растворения под давлением установлено [41], что последние характерны только для отдельных участков отдельных зерен изучаемого агрегата. Например, для зерна 1 (фиг. 20) явление растворения отчетливо наблюдается на контакте с зерном 2, менее отчетливо — на контакте с зерном 3, а с зернами 4 и 13 отсутствует. На разных участках даже одного шлифа структуры растворения под давлением различаются по интенсивности проявления и пространственной ориентировке.

Основная черта рассматриваемых структур заключается в том, что одно из контактирующих зерен практически всегда сохраняет свою форму, и его внедрение в другое зерно (на участках внедрения гематитовая оторочка как бы растушевана, размыта) идет за счет выноса из зоны контакта материала второго, контактирующего с ним зерна. Например, в паре зерен 1–2 зерно 1 сохраняет свою форму, а зерно 2 подвергается интенсивному растворению; в парах зерен 1–3, 15–16, 16–17 более интенсивно растворены зерна 3, 15 и 17.

Иногда в подверженных растворению зернах в зоне из контакта с зернами внедряющимися отмечены ореолы напряжений, фиксируемые по изменению оптической ориентировки. В целом приведенные соотношения



Ф и г. 21. Структуры растворения под давлением на контактах зерен кварца шокшинского кварцитовидного песчаника

a — общий вид изучаемого участка породы в шлифе под микроскопом (увел. 150, николи скрещены) и ориентировка оптических осей зерен кварца. Цифры — номера замеров. Линии в зернах — оптические оси, цифры у оптических осей — углы их наклона относительно плоскости шлифа; *b* — схема ориентировки сечений ZY указательных поверхностей модуля Юнга. Пунктиром показано положение сечения для зерна, в котором оптическая ось наклонена под углом 10° к плоскости шлифа

однозначно указывают на резкое различие физико-механических свойств контактирующих индивидов.

Проведенное изучение оптической ориентировки пар зерен со структурами растворения в зонах контакта выявило весьма важный факт: внедрение одного зерна в другое наблюдается только при различной пространственной ориентировке оптических осей контактирующих зерен (зерна 1-2, 1-3, 15-16, 16-17 и др.).

Для уточнения угловых соотношений между оптическими осями пар зерен, образующих структуры растворения типа рассмотренных на фиг. 20, выходы оптических осей 10 пар контактирующих зерен были нанесены на сетку Вульфа. Результаты измерений показали, что угол между оптическими осями контактирующих зерен в данном случае закономерен и располагается в интервале $45-85^\circ$; в среднем он равен 60° .

Проверка полученных результатов на парах зерен, оптические оси которых лежат в плоскости шлифа (фиг. 21), подтвердила обнаруженную закономерность: угол между оптическими осями контактирующих зерен с отчетливо выраженным растворением в зоне контакта (зерна 1-2) равнялся 60° . Для пары зерен 1-3, где явление растворения в зоне контакта выражено менее отчетливо и имеет вид микростиллолитовой структуры, угол между оптическими осями равен $\sim 80^\circ$. Полученные данные достаточно определенно указывают на ведущую роль в рассматриваемом

процессе кристаллических структур контактирующих упруго-анизотропных индивидов.

С учетом результатов проведенного изучения нами была предпринята попытка рассмотреть в структурах растворения поведение контактирующих зерен кварца с позиции упругих свойств минерала. Для этого мы ориентируем, согласно положению лежащих в плоскости шлифа оптических осей, одно из трех сечений указательной поверхности модуля Юнга наиболее устойчивого в поверхностной части Земли низкотемпературного кварца. Построение выполнено для правого кварца.

Полученная схема ориентировки упругих констант зерен кварца агрегата (фиг. 21) показывает, что избирательное внедрение одного зерна в другое наиболее полно проявляется лишь в том случае, когда в контактирующих зернах направления, характеризующиеся максимальными и минимальными значениями модуля Юнга, взаимно параллельны; в противном случае структуры растворения на границах контактирующих зерен выражены недостаточно отчетливо или вообще отсутствуют. Наибольшее растворение зерна отмечается под углом $\sim 70^\circ$ к оптической оси, т.е. в направлении, субпараллельном E_{\min} .

Наличие деформационных полосок в зерне 1 (рис. 21) при отсутствии аналогичных образований в соседних зернах позволяет считать, что в ходе формирования рассматриваемых структур подверженные растворению зерна кварца находились в более напряженном состоянии, чем соседние, внедряющиеся в них зерна. Наблюдаемое физическое внедрение более устойчивых зерен кварца в менее устойчивые, подверженные растворению, как и наблюдаемые в зернах ореолы напряжений, однозначно указывают на весьма значительную роль пластической деформации зерен породы в ходе становления межзеренных структур растворения под давлением.

В целом результаты проведенного изучения особенностей развития межзеренных структур растворения в кварцитовидном песчанике отчетливо показали ведущую роль кристаллической структуры упруго-анизотропного индивида в данном процессе.

Регенерационные структуры

Существующие представления о явлении регенерации индивидов литифицированной осадочной кварцевой породы лишены однозначности и в основном связываются с формой пространства между зернами, темпом подачи SiO_2 и особенностями роста отдельного зерна [57, 74, 87].

Указанные представлены, как и примененные методики исследования, недостаточно эффективны, поскольку они не вскрывают физическую природу рассматриваемого явления. Развитие регенерационных оторочек (регенерационных структур) сложнее и, по-видимому, может быть сведено к проблеме поведения деформированных кристаллов в перенасыщенной среде, т.е. к проблеме, изучение которой практически только начинается [105, 114, 130], а точнее — к еще менее освещенной проблеме: поведению высокопористого агрегата деформируемых минеральных зерен в перенасыщенной среде.

Выявление особенностей, измерение, сопоставление и интерпретация результатов изучения структурных признаков исходной и регенерирован-

ной породы представляется практически единственным путем познания причин, контролирующих развитие регенерации зерен кварца в высокопористом, содержащем межзеренный флюид агрегате, каким является исходная рыхлая осадочная порода.

В данном разделе приведены результаты изучения явления регенерации индивида в высокопористом агрегате [44]. Были исследованы: а) общие закономерности формирования равновесной гранобластовой структуры, связанной с регенерацией зерен кварца исходной осадочной породы, и б) причины, предопределяющие развитие равновесной формы регенерированного зерна кварца в ходе становления регенерационной структуры.

Шокшинский кварцитовидный песчаник. В шокшинских кварцитовидных песчаниках, петрографическое описание которых было приведено ранее (фиг. 16–19), регенерационные оторочки в шлифах под микроскопом отчетливо различимы на реликтовых зернах кварца, поскольку последние окружены тонкими каемками гематита по всему периметру. Развитие регенерационных оторочек иногда идет по зернам с микроскопически выраженными элементами пластической деформации (уплощенная форма зерен, извилистые контакты, микродеформационные структуры).

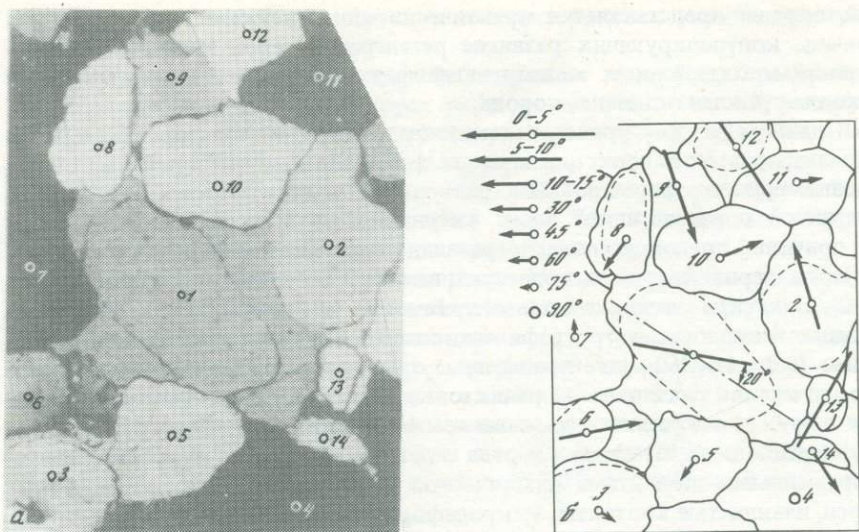
Изучение явления регенерации на примере шокшинского кварцитовидного песчаника показало, что непосредственно регенерационные оторочки составляют примерно 10–15% от всей изученной площади шлифов (определение проводилось точечным методом); это в принципе характерно для развития структур рассматриваемого типа. Установлено, что регенерационные оторочки в пористом агрегате возникают вокруг отдельных зерен, преимущественно в определенных направлениях. Отмеченную закономерность можно видеть на рисунках, приведенных в любой работе, посвященной рассматриваемой проблеме [74, 155], включая и работы экспериментального плана [129, 137].

Данное явление отчетливо видно на фиг 22, а. Из образующих пустотупору зерен 1, 2, 4, 5–8, 13 только зерно 1 имеет регенерационную оторочку. Оторочка вытянута преимущественно в направлении зерен 8–13. Она на зерне 2 не развивалась в сторону зерна 1, а приурочена к направлению между зернами 11–13, хотя оба зерна (1 и 2) примыкают к общей пустотепоре.

Для уточнения результатов морфологического изучения по структурным карточкам (б) ориентировка длинных осей исходных и регенерированных зерен сопоставлена с ориентировкой их оптических осей. На структурных карточках можно видеть, что наиболее отчетливо регенерационные оторочки наблюдаются только у тех зерен, оптические оси которых лежат в плоскости шлифа (зерна 1 и 2).

При данном числе наблюдений установить статистически обоснованную зависимость развития регенерационных оторочек от формы зерен не представлялось возможным. Вместе с тем совершенно отчетливо устанавливается следующее: преобладающее развитие регенерационной оторочки относительно оптической оси происходит под углом примерно 20° (зерна 1 и 2).

Сопоставление особенностей развития регенерационных оторочек зерен 1 и 2 (а) показывает, что оно не может быть объяснено только формой пространства между зернами: оба зерна примыкали к одной и той же



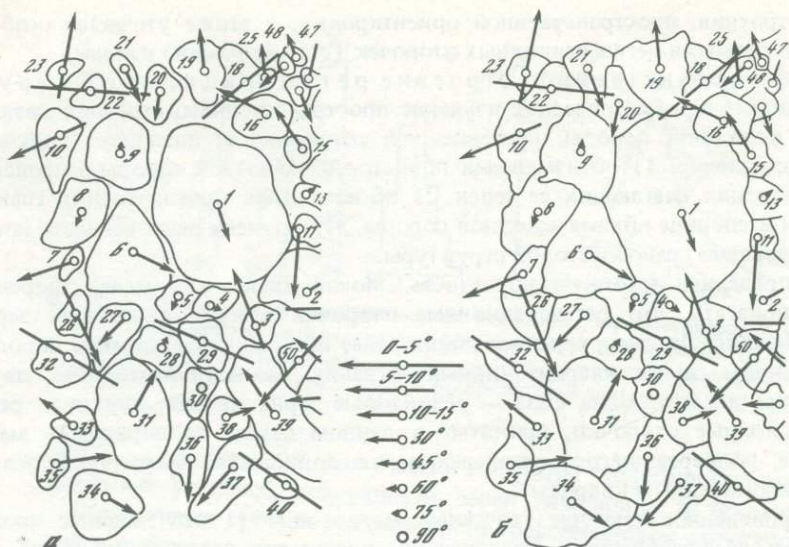
Ф и г. 22. Шокшинский кварцитовидный песчаник

a — общий вид изучаемого участка породы в шлифе под микроскопом; увел. 80, николи скрещены; *b* — структурная карточка участка *a*. Пунктирные линии — контуры реликтовых зерен. Цифры в зернах — порядковые номера замеров. Стрелки и линии в зернах — ориентировка оптических осей. Масштаб наклона оптических осей к плоскости шлифа — в верхней части рисунка

пустоте-поре, но направление роста оторочек в каждом из зерен в пространстве различно. Развитие форм зерен в процессе регенерации не соответствует габитусным формам идеального кристалла кварца.

Толкачевский кварцитовидный песчаник. Проведенное изучение, как уже отмечалось, показало, что структуры рассматриваемой породы обусловлены развитием элементов пластической деформации, межзеренных структур растворения под давлением и регенерации. Поскольку указанные элементы в пределах толщи кварцита развиты неравномерно, для исследования были взяты образцы с отчетливо выраженными регенерационными структурами. В шлифах указанных образцов под микроскопом реликтовые зерна отчетливо видны при одном николе по тонким каемкам гематита, окружающим зерна по всему периметру. Нарушения каемок гематита на реликтовых зернах кварца последующими тектоническими воздействиями однозначно не установлены (табл. II).

Оптическая ориентировка регенерационных оторочек соответствует оптической ориентировке исходных зерен кварца. Развитие регенерационных оторочек (их ширина до 0,3 размера исходных зерен) неравномерно и вокруг отдельных зерен, и в зоне контакта между соседними зернами. В последнем случае регенерационная оторочка одного зерна может быть значительно больше, чем соприкасающаяся с ней оторочка зерна соседнего, что в целом подтверждает морфологические особенности развития регенерационных оторочек, установленные в ранее рассмотренном примере (фиг. 22). Весьма характерно, что направление развития регенера-



Фиг. 23. Выкопировка части структурной карты участка кварцитовидного песчаника (см. таблицу II)

а — структурная карта, построенная по реликтовым зернам, б — по регенерированным зернам. В зернах кварца показаны ориентировка и наклон оптических осей к плоскости шлифа. Масштаб наклона оптических осей — в нижней части рисунка

ционных оторочек — удлинение регенерированных зерен — в данном случае не всегда наследует ориентировку длинных осей исходных зерен.

Ориентируясь по структурным картам на контуры зерен и положение их оптических осей (фиг. 23), можно видеть, что форма исходных зерен обусловлена развитием в основном иррациональных поверхностей ограничения. Для регенерированных зерен сохраняется та же закономерность. Форма новообразованных зерен сложная. Ее можно представить в виде многоугольника с большим числом "граней", причем положение последних в общем случае нельзя охарактеризовать кристаллографическими индексами: оно предопределяется соседними зернами, количество которых может достигать до 30 и более.

В примере, взятом для исследования, практически все зерна кварца исходной породы регенерированы. В отличие от гранобластовой структуры, обусловленной пластической деформацией каркасообразующих зерен кварца, гранобластовая регенерационная структура сложена полигональными равновесными зернами и может быть названа мостовой, мозаичной, полигональной [75].

Изучение структурных особенностей проводилось на двух участках, расположенных в шлифе относительно друг друга на расстоянии около 6 мм. Участок 1 сложен зернами кварца различных размеров (таблица II), участок 2 — зернами кварца примерно одинакового размера. Поскольку в геологической литературе отсутствуют полуколичественные характеристики подобных структур, автором проведено изучение их пространственно-

го строения, пространственной ориентировки, а также уточнены особенности развития регенерационных оторочек (статистические данные).

Пространственное строение регенерационной структуры. Стереометрическое изучение пространственного строения кварцевой осадочной породы, претерпевшей регенерацию, позволяет получить представление: 1) об изменении пористости осадочной породы в процессе регенерации слагающих ее зерен, 2) об изменении протяженности границ зерен в единице объема исходной породы, 3) о степени равновесности новообразований гранобластовой структуры.

Определим исходную пористость. Можно более или менее уверенно предполагать, что регенерационные оторочки вокруг кварцевых зерен развивались за счет существовавших ранее пор рыхлой осадочной породы. В данном случае кварцитовидный песчаник рассматривается как двухфазный агрегат: одна фаза — реликтовые зерна кварца, другая — регенерационные оторочки, принятые в данном случае за пористость материала, подвергавшегося регенерации, т.е. пористость, закрытую впоследствии аутигенным кварцем.

Проведенное изучение (точный метод — [19]; исследование проводилось по увеличенным фотографиям изучаемых участков шлифов) показало, что исходная пористость для обоих участков сопоставима: $17,2 \pm 1,5\%$ (участок 1) и $24,5 \pm 1,6\%$ (участок 2), в среднем 21%.

Вычислим изменение относительной удельной поверхности зерен. Суммарная площадь поверхности индивидов одной из фаз двухфазного агрегата в единице объема (удельная поверхность S_a мм²/мм³) определялась методом максимальных хорд, что обусловлено разнотернистостью материала и ограниченным количеством зерен (определение велось на основе больших фотографий изучаемых участков; \bar{h} — средняя хорда).

Относительная удельная поверхность определялась по формуле $S_a = 4/\bar{h}$ мм²/мм³, предложенной С.А. Салтыковым [84, с. 187]; определение относительной погрешности — дисперсия распределения видимых максимальных хорд зерен — стандартное [108].

Сопоставление полученных значений удельной поверхности зерен исходных (реликтовых) и регенерированных впервые позволило достоверно оценить происходящее при литификации изменение граничных поверхностей в единице объема.

Для наиболее разнотернистого участка 1 были получены следующие результаты. Исходный песок: средняя хорда фазы терригенной

$$\bar{h} = 0,16 \text{ мм} \pm 6,7\%.$$

Относительная удельная поверхность терригенной фазы

$$S_a = 25 \text{ мм}^2/\text{мм}^3.$$

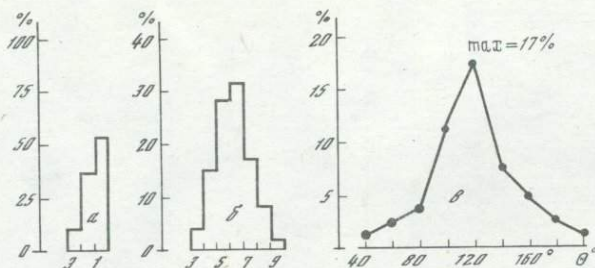
Кварцитовидный песчаник (регенерированный материал): средняя хорда регенерированных зерен

$$\bar{h} = 0,2 \text{ мм} \pm 7\%.$$

Относительная удельная поверхность регенерированных зерен

$$S_a = 20 \text{ мм}^2/\text{мм}^3.$$

Изменение относительно удельной поверхности зерен кварца при литифи-



Ф и г. 24. Толкачевский кварцитовидный песчаник. Стереометрическая характеристика гранобластовой структуры, обусловленной регенерацией (фиг. 23)
 а — гистограмма кривизны границ зерен; б — гистограмма форм сечений зерен, наблюдаемых в шлифе; в — кривая распределения двугранных углов (см. фиг. 1)

кации — в среднем 22%, для участка 2 пределы колебаний изменений относительной удельной поверхности зерен находились в тех же пределах.

Определение степени равновесности гранобластовой структуры, возникшей в результате регенерации зерен кварца исходной породы, проводилось на основе следующих оценочных параметров: характер границ зерен, форма зерен в плоском сечении, кривые распределения двугранных углов.

Изучение морфологических признаков, выполненное для участка 1 показало следующее (фиг. 24). Границы зерен недостаточно прямолинейны, искривленных границ до 40%. Форма зерен в плоских сечениях преимущественно пяти- и шестиугольная. Кривая распределения двугранных углов имеет четко выраженный максимум при 120° , равный 17%. Для участка 2 результаты морфологического изучения сопоставимы с приведенными выше при несколько большем (19%) значении максимума кривой распределения двугранных углов.

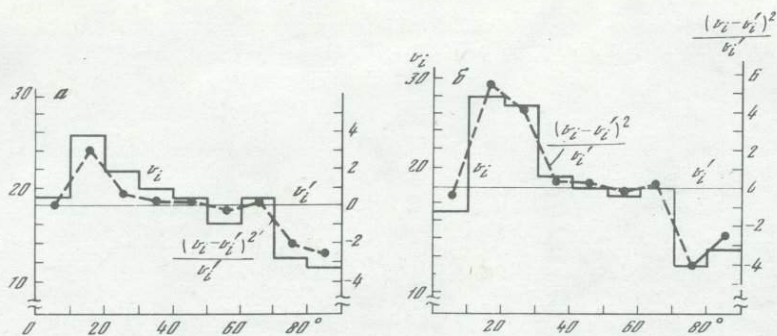
Приведенные данные свидетельствуют, что в процессе регенерации зерен кварца рыхлой осадочной породы сразу возникает весьма совершенная равновесная гранобластовая структура.

О р и е н т и р о в к а з е р е н к в а р ц а и з у ч а е м ы х п о р о д.

Изучение оптической ориентировки зерен пород, дополненное изучением ориентировки тех же зерен по удлинению (замеры по площади; каждая диаграмма строилась по 100 замерам), не дало положительных результатов при изучении явления регенерации. При данном числе замеров, считающемся в микроструктурном анализе достаточным [50, 66], оптическая ориентировка зерен кварца выражена слабо. Для каждого участка пространственное положение максимумов было различно.

На диаграмме, составленной на основе замеров двух участков (200 замеров), оптическая ориентировка стала еще менее наглядной (максимум 3%). В целом оптическая ориентировка зерен рассматриваемой породы принципиально не отличалась от общеизвестной ориентировки осадочных кварцевых пород.

Не дало положительных результатов и изучение ориентировки зерен по удлинению, хотя преобладающая пространственная ориентировка, не свойственная агрегату зерен исходной породы, отмечалась как в исходных, так и в регенерированных зернах кварца. Различия в ориентировке



Ф и г. 25. Толкачевский кварцитовидный песчаник. Результаты проверки гипотезы о равномерном распределении углов между длинными осями зерен кварца и их оптическими осями

a — реликтовые зерна, *б* — зерна регенерированные. Обозначения в тексте (табл. 4 и 5)

зерен по удлинению наблюдались при сопоставлении диаграмм, построенных для реликтовых зерен и зерен регенерированных, не только между соседними участками, но и в пределах одного и того же участка. Однако различия были не настолько существенными и однозначными, чтобы по ним можно было сделать какие-либо определенные выводы.

Сопоставление между собой узоров диаграммы оптической ориентировки и диаграммы, отражающих ориентировку тех же зерен по удлинению, также не дало однозначных результатов: ориентировку по удлинению нельзя было сопоставить с ориентировкой оптической.

Особенности развития регенерационных оторочек. Изучение проводилось на основе предложенной автором методики "угловых соотношений". Для реликтовых зерен кварца гистограммы, построенные отдельно для участков 1 и 2, при данном числе замеров однозначно подтвердили отсутствие связи между удлинением зерен и положением их оптических осей. На общей гистограмме, построенной на основании замеров обоих участков (табл. 4), намечается небольшой максимум в интервале 10–20° (фиг. 25, *a*).

Иной характер гистограмм наблюдается в случае регенерированных зерен кварца. При сопоставлении гистограмм участков 1 и 2 на обеих гистограммах отчетливо проявляется максимум в интервале 10–30°. На общей гистограмме, построенной на основе замеров обоих участков (табл. 5), угол между оптической осью и удлинением зерен в интервале 10–30° проявляется весьма отчетливо (фиг. 25, *б*).

Сопоставление полученных результатов позволяет предполагать, что в процессе регенерации форма зерен развивается относительно оптических осей статистически закономерно и не зависит от размеров (и формы) зерен исходной породы. Эта закономерность становится особенно наглядной при проверке возможности использования модели равномерного распределения применительно к данному случаю. Вычислив значение критерия χ^2 и сопоставив его с табличным значением при заданном уровне значимости, получаем данные, приведенные в табл. 5. Значение $\chi^2 = 9,61$ для общей гистограммы реликтовых зерен (*a*) однозначно указывает

на отсутствие при данном числе замеров связи между ориентировкой зерен по удлинению и положением их оптических осей (табличное значение $\chi_{0,05}^2$; 8 ст.св = 15,5).

Для регенерированных зерен кварца (б) результаты обработки общей гистограммы по принятой методике показывают, что гипотеза равномерного распределения изучаемых величин в данном случае неприемлема (вычисленное значение $\chi^2 = 17,8$, табличное значение $\chi_{0,05}^2$; 8 ст.св = 15,5).

Для уточнения общего характера отклонения результатов испытаний от равномерного распределения соединим точки значений квадратов средневзвешенных отклонений и получим ломаную линию (кривую) квадратов средневзвешенных отклонений от теоретического распределения $(v_i - v_i')^2/v_i'$ (б). Совместив ее с гистограммой, построенной по экспериментальному материалу, определим участки наибольшего отклонения от равномерного распределения. Наибольшее удлинение зерен относительно оптической оси наблюдается в интервале 10–30° (максимум 20°), наименьшее — в интервале 70–80°. Преобладающий рост зерен в рассматриваемом случае аналогичен установленному в ранее рассмотренном примере (фиг. 22).

Некоторые выводы. Изучение связанных с регенерацией структурных преобразований осадочной кварцевой породы показало, что в их основе лежит дорастание зерен кварца исходной рыхлой породы до заполнения всегда свободного пространства между зернами, т.е. практически до полного исчезновения пористости. Регенерированные зерна, примыкая друг к другу, образуют связанную сетку граничных поверхностей во всем объеме новообразованной плотной породы. Возникает типичная для новообразованного кварцитопесчаника гранобластовая структура, сменяющая кластическую структуру исходного рыхлого осадка.

Для указанной гранобластовой структуры характерны слегка искривленные границы зерен (условие равновесия сетки границ зерен под действием поверхностного натяжения [103]), достаточное приближение форм плоских сечений зерен, наблюдаемых в шлифах (преимущественно шести- и пятиугольной формы), к теоретически установленному распределению [83, 103], соответствующее теоретическому нормальное распределение двугранных углов с максимумом при 120° [135, 156], отсутствие элементов последующей пластической деформации [43].

Полученные данные позволяют считать, что возникшая в результате регенерация индивидов гранобластовая структура — равновесная. Она обусловлена регенерацией, возникает сразу, минуя предполагаемые промежуточные стадии развития [51]. Форма каждого зерна рассматриваемой структуры также равновесная. Судя по структурным карточкам, для равновесной формы регенерированного зерна характерна произвольная ориентировка граней внешнего "чехла" относительно оптической оси зерна при вполне отчетливо наблюдаемом удлинении регенерированных зерен.

Изучение регенерированных зерен показало, что их становление не контролировалось формой порового пространства, не было связано с габитусными формами идеального кристалла кварца, не зависело от формы и размеров исходных кластических зерен; на диаграммах ориентировки зерен по удлинению отчетливая преимущественная ориентировка длинных осей регенерированных зерен в пространстве не наблюдалась.

Т а б л и ц а 4
График плотности вероятности χ^2 -распределения
(реликтовые зерна; интервалы в градусах)

Последовательность обсчета	0-10	10-20	20-30	30-40
Экспериментальные частоты (v_i)	19	26	22	20
Частоты, ожидаемые для равномерного распределения (v'_i)	18,22	18,22	18,22	18,22
Разности ($v_i - v'_i$)	0,78	7,78	3,78	1,78
Квадраты разностей ($v_i - v'_i$)	0,61	60,53	14,29	3,17
Взвешенные квадраты отклонения $\frac{(v_i - v'_i)^2}{v'_i}$	0,03	3,22	0,78	0,17

Табличное значение $\chi^2_{0,05}$; 8 ст.св = 15,5.

Т а б л и ц а 5
График плотности вероятности χ^2 -распределения
(регенерированные зерна; интервалы в градусах)

Последовательность обсчета	0-10	10-20	20-30	30-40
Экспериментальные частоты (v_i)	15	28	27	19
Частоты, ожидаемые для равномерного распределения (v'_i)	18	18	18	18
Разности ($v_i - v'_i$)	-3,0	10,0	9,0	1,0
Квадраты разностей ($v_i - v'_i$) ²	9,0	100	81	1,0
Взвешенные квадраты отклонения $\frac{(v_i - v'_i)^2}{v'_i}$	0,5	5,56	4,5	0,05

Табличное значение $\chi^2_{0,05}$; 8 ст.св = 15,5.

На основе методики "угловых соотношений" выявлено главное: развитие удлиненной формы регенерированных зерен в высокопористом, содержащем межзеренный флюид агрегате статистически закономерно — зерна кварца относительно оптических осей развивались преимущественно под углом 20° . Установленное развитие регенерированных зерен кварца под этим углом к оптической оси зерна (перпендикулярно E_{\min} низкотемпературного кварца) указывает на главное — основополагающую роль кристаллической структуры упруго-анизотропного индивида в развитии явления регенерации. Природа рассматриваемого явления может быть представлена следующим образом.

Возникающие на заключительном этапе развития литификации породы

40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	n = 9
19	16	19	12	11	$\Sigma = 164$
18,22	18,22	18,22	18,22	18,22	$\Sigma = 163,98$
0,78	-2,22	0,78	-6,22	-7,22	-
0,61	4,93	0,61	38,69	52,13	-
0,03	0,27	0,03	2,12	2,86	$\Sigma = 9,61$

40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	n = 9
18	17	18	9	11	$\Sigma = 162$
18	18	18	18	18	$\Sigma = 162$
0,0	-1,0	0,0	-9,0	-7,0	
0,0	1,0	0,0	81,0	49,0	
0,0	0,05	0,0	4,5	2,72	$\Sigma = 17,88$

межзеренные структуры растворения под давлением предопределяют вынос кремнекислоты в поровые растворы. Последние могут оказаться пересыщенными по отношению к отдельным зернам. Избирательное отложение SiO_2 из поровых растворов, определяющее анизотропию скоростей роста индивида агрегата в процессе регенерации (под углом $\sim 20^\circ$ к оптической оси), в первую очередь обусловлено положением наименее напряженных зон в наименее напряженных зернах породы; последнее предопределяется особенностями пластической деформации зерен породы (в ходе развития указанных процессов плоскости скольжения ориентируются относительно оптической оси зерна под углом $15-25^\circ$).

Вывод о связи регенерации с релаксацией внутризеренных упругих

напряжений позволяет принять следующее. Становление равновесной формы отдельного регенерированного зерна новообразованной гранобластовой структуры контролируется рядом взаимосвязанных факторов: напряженно-деформированным состоянием индивидов, их анизотропным ростом, особенностями заполнения пространства, проявлением законов поверхностного натяжения. Анализ указанных выше факторов позволяет автору принять представление о том, что первопричиной проявления всех указанных факторов является новый, более сильный и ранее не учитываемый при подобных построениях внутренний фактор: реакция индивида на изменение внешних условий, контролируемая анизотропией его упругих свойств.

Поскольку формирование равновесной гранобластовой структуры, обусловленной регенерацией, связано с закономерным ростом слагающих ее индивидов, постольку указанная выше первопричина предопределяет и контролирует весь ход структурных преобразований исходной осадочной породы в ходе развития регенерации: возникновение объемно-напряженного состояния зерен агрегата, их анизотропный рост, уменьшение кривизны граничных поверхностей зерен кластической структуры, уменьшение протяженности границ зерен в единице объема исходной породы в ходе регенерации индивидов (в рассматриваемом случае на 22%), формирование телесных и двугранных углов, сетки граничных поверхностей новообразующейся гранобластовой структуры.

Обсуждение результатов

При захоронении под действием вышележащих пород и повышающейся температуры исходный песок претерпевает необратимые изменения, отражающие его приспособление к новым условиям. Указанные изменения проявляются в закрытии исходной пористости (от 50% в исходном песке до 0,2–0,3% в плотных кварцитовидных песчаниках), удалении межзеренного флюида и изменении структурных признаков — смене кластической структуры исходного осадка гранобластовой структурой, характерной для плотных осадочных пород. Судя по литературным данным [123], в определенных пределах подтвержденных результатами наших опытов (таблица X), постседиментационные преобразования не требуют условий глубинного эпигенеза, так как могут происходить при давлении 1 кбар и температуре порядка 100–150 °С.

Полученные результаты изучения шокшинских и толкачевских кварцитовидных песчаников не подтвердили распространенного представления о ведущей роли в явлении литификации процесса растворения под давлением, поскольку основной процент закрытия пористости связывается с пластической деформацией каркасообразующих зерен. Пористость в ходе развития литификации закрывается в результате: механического уплотнения — до первых процентов [74 и др.]; физического уплотнения — пластическая деформация — до 75–95%; эпигенетических процессов перераспределения SiO_2 (растворение под давлением, регенерация) — до 25%.

Столь значительная роль пластической деформации не удивительна, так как по мере увеличения глубины захоронения исходного песка су-

ществленную роль начинает играть фактор всестороннего сжатия. Подавляя растягивающие компоненты напряжений и препятствуя тем самым образованию разрывов, указанный фактор существенно стимулирует пластичность обломочных зерен кварца.

Проведенное изучение показало главное: изменение пространственного строения агрегата практически не затрагивает пространственную ориентировку индивидов исходной породы. Пространственная ориентировка литифицированной породы, как и пород исходных, характеризуется ближним порядком. Структурные изменения породы при литификации в основном касаются только формоизменения зерен индивидов.

Рассматривая основной вопрос структурных преобразований кварцевой породы в ходе литификации — формоизменения слагающих породу зерен, можно было видеть, что оно закономерно, т.е. относительно оптической оси зерна: длинные оси пластически деформированных зерен ориентировались по углом $\sim 20^\circ$, преобладающее растворение зерен происходило под углом $\sim 70^\circ$, дорастание зерен в процессе регенерации — под углом $15-25^\circ$.

Полученные результаты отчетливо указывают на решающую роль кристаллической структуры упругоанизотропного зерна кварца в процессах постседиментационных преобразований песчаной породы, поскольку все полученные угловые соотношения однозначно коррелируются с упругими свойствами низкотемпературного кварца (фиг. 4).

Приведенные данные позволяют автору считать, что внутренняя реакция породы на изменение внешних условий, предопределяемая и контролируемая анизотропными упругими свойствами индивида, независимо от механизма явления, может считаться ведущим фактором в развитии литификации. Автор рассматривает указанную реакцию в качестве основного структурообразующего фактора, предопределяющего и объясняющего весь ход структурных изменений в ходе развития литификации.

И последнее. Учитывая все возрастающий интерес геологической общности к стадии эпигенеза (катагенеза) в формировании осадочных пород и руд, интерес, распространяющийся сейчас не только на силикатные, но и на алюмосиликатные составляющие, а также затрагивающий такие "неустойчивые" компоненты, как карбонаты, сульфиды, сульфаты, битумоиды и различные рудные минералы [100], отметим следующее. Стадия эпигенеза — сложный многоплановый процесс взаимодействия осадочных и вулканогенно-осадочных пород, пластовых вод, рассеянного органического вещества, нефтей, различных газов, процесс, направленный на становление стационарного состояния системы в обстановке увеличивающихся параметров внешнего воздействия. И вполне естественно, что серьезные исследования, направленные на уточнение сущности различных эпи- и катагенетических преобразований практически невозможны без системного подхода, без учета анизотропии основных свойств взаимодействующих индивидов, без аргументированных представлений о физической природе и закономерностях структурообразования изучаемых объектов.

Часть вторая

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КВАРЦЕВЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ МЕТАМОРФИЗМА

Литифицированная песчаная порода, в ходе геологического развития оказавшаяся в условиях метаморфизма, будет приспосабливаться к новым условиям: в ней возникают и развиваются новые структуры — деформационные и рекристаллизационные. Развитие указанных структур предопределено отличием условий эпигенеза от условий метаморфизма: более высокое всестороннее давление (от 1 до 15 кб), температура (от 100—300 до 700—750°С, [14 и др.]), наличие дифференциальных напряжений, обуславливающих деформацию пород, особенно интенсивно проявляющихся в орогенных областях.

По литературным данным, скорость деформирования пород в природных условиях невелика: $3 \cdot 10^{-14} \text{ с}^{-1}$ [138 и др.].

При изучении структурных особенностей метаморфических пород в геологических фундаментальных работах, посвященных этой проблеме, преобладает традиционный подход, основанный на интерпретации структурно-геологических данных с позиций сведений, полученных из смежных областей знаний — физики, физического материаловедения и др. [14, 159 и др.]. Подобный подход к объяснению структур метаморфизованных пород недостаточно аргументирован не только потому, что установленные закономерности деформации и рекристаллизации выявлены на материале с иным — металлическим — типом связей. Существеннее следующее. В настоящее время существуют два различных подхода к изучению процесса пластической деформации твердых тел: она описывается с помощью математического аппарата либо рассматривается на атомно-кристаллическом уровне с учетом роли дефектов кристаллической решетки. Оба подхода (математические теории, дислокационные модели) не свободны от недостатков и противоречий [49 и др.].

Восполняя пробел между указанными подходами, существующие петрографические модели структурообразования при деформации поликристаллов с исходной беспорядочной структурой [15 и др.] также отражают изотропный подход к явлению и поэтому неоднозначны в общих исходных положениях. Несмотря на огромное количество данных, полученных исследователями при изучении металлов и их сплавов, представления о физической природе деформации указанных материалов нуждаются в уточнении.

Все сказанное справедливо и для структур, возникающих в другом, изученном в еще меньшей степени, но весьма характерном для метаморфизованных и метаморфических пород процессе, — при рекристаллизации. В металлофизике и физическом материаловедении при рассмотрении данного явления обычно констатируется лишь сам факт его существо-

вания, а физические основы явления разработаны в весьма общих чертах [15 и др.].

Уточнению физической сущности пластической деформации и рекристаллизации материала с неметаллическим типом связей — кварцевой породы в условиях метаморфизма — и посвящен данный раздел работы. В нем вначале исследуются общие закономерности развития деформационных и рекристаллизационных структур метаморфизованных кварцевых пород, а затем, на основе результатов приведенного исследования, выводятся представления о физической природе рассматриваемых явлений (раздельно для деформационных и рекристаллизационных структур).

О СООТНОШЕНИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫХ СТРУКТУР МЕТАМОРФИЗОВАННЫХ КВАРЦЕВЫХ ПОРОД

Результаты полевых исследований

Наиболее подходящие объекты для изучения соотношения метаморфогенных деформационных и рекристаллизационных структур — малые структурные формы типа структур будинажа, поскольку благодаря своим морфологическим особенностям пластическая деформация пород фиксируется однозначно. В данном разделе в основном рассматриваются тектурные и структурные особенности кварцита в будинированной первично слоистой кварцито-мраморной толще Юго-Западного Прибайкалья (архей).

В литературе о древних архейских породах обычно описывались отдельные локальные случаи будинирования амфиболитов, диабазов, пегматитов в различных сланцах и гнейсах. Затем появились описания структур будинажа регионального масштаба [17, 57]. Рассматриваемый в данной работе пример проявления структур будинажа примечателен как масштабами, так и своей необычностью, поскольку в кварците будинируются прослой мрамора. Подобные структуры удалось наблюдать в толщах так называемых кварц-диопсидовых пород, развитых в пределах слюдянской (южная оконечность озера Байкал) и слюдянско-зыркузунской (верховье р. Иркут) свит [85].

Обе свиты архея сложены помимо толщ кварц-диопсидовых пород перемежающимися разностями мраморов (обычно доломитового состава) и различными гнейсами. Единого взгляда на стратиграфию докембрийских толщ Хамар-Дабана и Юго-Западного Прибайкалья нет, что объясняется исключительной сложностью тектоники района и недостаточной изученностью отдельных его участков [106 и др.]. Толщи "кварц-диопсидовых пород" указанных свит образуют самостоятельные горизонты (мощностью до 200—400 м, протяженностью десятки километров), представляющие собой довольно пеструю перемежаемость кварцитовых, диопсидовых и мраморных (диопсидизированных в краевых частях) пропластков; это и обуславливает их полосчатый облик.

Поскольку мощность указанных пропластков, как и протяженность их, колеблется в широких пределах, для горизонтов данных пород характерен самый различный переход тонкополосчатых текстур и грубополосчатые и наоборот. Последнее приводит к тому, что отдельные участки

не только различных, но даже одних и тех же горизонтов кварц-диопсидовых пород практически несопоставимы из-за значительных количественных колебаний минерального состава (от чистых кварцитов через кварц-диопсидовые породы до чистых мраморов).

Происхождение полосчатости кварц-диопсидовых толщ специально никем не исследовалось, и почти во всех работах по району обычно указывалось, что она представляет собой "слоистость первичной осадочной породы, осложненную процессами метаморфизма" [85], при этом сам процесс не детализировался. Проведенное изучение полосчатости позволило уточнить это положение.

Наглядное представление о причинах столь характерного поведения полосчатости можно составить, рассматривая сечения кварц-диопсидовых толщ, перпендикулярные их простиранию. На таких сечениях удастся наблюдать отдельные блоки (линзы) мрамора, заключенные в кварците, причем достаточно четко видно, как кварцит их обтекает. На приведенном снимке (таблица III, а) можно видеть и отмеченную выше картину течения кварцита, и различный характер полосчатости кварц-диопсидовой толщи.

На контакте мраморных линз (доломитового состава) с кварцитом отмечается развитие биметасоматической диопсидовой оторочки (образовавшейся в результате взаимодействия кремнекислоты кварцитов с доломитами мраморов). Развитие диопсида отмечается и по тектонически ослабленным зонам внутри мраморных линз, что хорошо видно (б) по более светлому цвету диопсида. Интенсивность "течения" кварцита подчеркивается тонкими изгибающимися полосками белого диопсида, придающими достаточную наглядность этому явлению (в).

Обособляющиеся блоки мрамора имеют овальную, приближающуюся к эллипсовидной форму, их длинные оси ориентированы согласно с простиранием кварц-диопсидовых толщ. Форма отдельных блоков мрамора в кварците довольно однообразна: в основном это линзы с плавными округлыми очертаниями без вогнутых контуров в краевых частях. Но встречаются линзы, как бы расчлененные на прямоугольные блоки (границы блоков прямые, ориентированы перпендикулярно направлению полосчатости породы). Для линз одного и того же обнажения характерны размеры, колеблющиеся в широких пределах на всех трех взаимно перпендикулярных сечениях.

Соотношение осей обособляющихся блоков мраморов может изменяться, но положение их по отношению к простиранию толщи остается постоянным. Различные размеры блоков линз приводят в конечном итоге к колебаниям минерального состава в объеме породы, к возникновению сложной полосчатости. Последним и обусловлена несопоставимость отдельных участков одной и той же толщи между собой.

Не исключено, что пластично деформирующийся кварцит, разобщающий, растаскивающий фрагменты мрамора в какой-то мере физически влиял на форму обособившихся блоков (г). На снимке видно, что стоящая под некоторым углом к направлению течения кварцита мраморная линза обрабатывается им. Это особенно заметно на срываемой текущим кварцитом белой диопсидовой оторочке в правой части снимка.

Изучением структурных особенностей породы в шлифах под микро-

скопом установлено, что обычно кварцит имеет гранобластовую структуру, и только полосчатый, закономерно ориентированный относительно линз мрамора характер расположения зерен кальцита, диоксида и апатита указывает на имевшуюся здесь пластическую деформацию (ϵ). Полученные данные показывают, что структурные особенности кварцита отражают не этап развития породы, связанный с ее пластической деформацией, а более поздний — связанный с рекристаллизацией; процесс рекристаллизации, судя по полученным данным, — региональный.

Основываясь на волнистом, полосчатом угасании, на несколько искривленных границах зерен, можно составить представление о проявлении еще одной, более поздней стадии пластической деформации — по зернам кварца рекристаллизационной структуры. Именно к таким проявлениям пластической деформации относятся встреченные нами очень редкие примеры развития локальных маломощных зон интенсивной пластичности (их особенности рассмотрены при разборе деформационных структур).

Основываясь на результатах исследования, принимаем следующее. Характерная полосчатость кварц-диопсидовых пород обусловлена процессом образования структур будинажа в первичнослоистых кварцито-мраморных толщах, который проявлялся неравномерно на различных участках, и происходил под действием ориентированного давления. Более хрупкие в этих условиях слои мрамора расчленились по различным поверхностям скольжения (скола), отрыва на ряд линзовидных блоков — будин. Клиновидные блоки мрамора, располагающиеся между смежными будинами (например, б — у молотка), как и ориентировка прямоугольных блоков мрамора в кварците (табл. III), дают основание считать, что ориентированное давление прилагалось в направлении, перпендикулярном полосчатости рассматриваемой кварцито-мраморной толщи.

Отметим необычность данных структур будинажа. Они необычны, во-первых, потому, что в рассматриваемом случае в процессе образования структур будинажа мрамор оказался прочнее пластично деформирующегося кварцита (в обычных условиях лабораторных испытаний мрамор имеет прочность на сжатие порядка $800\text{--}2000\text{ кг/см}^2$, а кварцит $3000\text{--}4000\text{ кг/см}^2$ [4]).

Появившиеся после опубликования данных наблюдений [25] результаты экспериментальных работ подтвердили справедливость сделанных выводов. По данным [152], при температуре 200°C прочность кварцитоц превышает прочность известняков меньше чем в 2 раза, а при 400°C наблюдаются обратные соотношения, и известняки в 10 раз прочнее кварцитов. Во-вторых, необычность проявления рассматриваемых структур будинажа заключается в масштабности явления: будинировались целые регионально развитые горизонты, мощностью до 400 м и протяженностью десятки километров.

Учитывая региональный характер развития горизонтов будинированных кварцито-мраморных толщ, мы вынуждены принять, что факторы, стимулирующие пластическую деформацию кварцита, должны иметь такое же региональное развитие, т.е. пластичность кварцита в данном случае вызывалась факторами, связанными с региональным метаморфизмом. Эта точка зрения подтверждается результатами изучения биметасоматического процесса диопсидизации, который сопровождает образование структур

будинажа и выражается, как уже отмечалось, в развитии белого магнезиального диопсида на контакте доломитового мрамора с кварцитом.

Факт одновременности образования структур будинажа и процесса диопсидизации до известной степени доказывается срывом диопсидовой оторочки с будин мрамора текущим кварцитом (типа фиг. в) и образованием диопсида в тектонически ослабленных зонах, по которым происходит дальнейшее расчленение будин (фиг. б).

Такая типичная для кварц-диопсидовых пород ассоциация минералов, как кварц-кальцит (и доломит-диопсид в зоне развития диопсидовой оторочки), указывает, что образование структур будинажа происходило в условиях глубокого метаморфизма. Это не противоречит существующим представлениям о том, что метаморфизм пород слюдянской свиты протекал в условиях наибольших глубин — в условиях безгроссуляровой фации [59]. Таким образом, пластическая деформация кварцита, необходимая для возникновения структур будинажа в первично-слоистых кварцито-мраморных толщах, возникла под действием ориентированного давления в условиях всестороннего сжатия при наличии растворов и соответствующем прогреве всей толщи (и, естественно, при определенной длительности процессов). В настоящее время установлено, что структуры будинажа (различных размеров и морфологии) — одна из характерных структурных форм Слюдянской кристаллической толщи.

Кратко рассмотрим результаты изучения еще одного примера развития структур будинажа — в древних кварцитах (верхний протерозой) толкачевской свиты УССР. Эта свита расположена в северной части Украинского кристаллического массива. Сложена рассмотренными ранее (таблица II) плотными мелкозернистыми кварцитопесчаниками (толкачевские кварцитовидные песчаники) с прослоями менее окварцеванных песчаников. В указанной толще залегают линзовидные пластовые тела пиррофиллитовых сланцев мощностью на отдельных участках в несколько метров при протяженности до первых сотен метров. Выходы пиррофиллитовых сланцев довольно широко распространены [53] (таблица IV).

Проведенное автором изучение особенностей залегания линз пиррофиллитовых сланцев, развитых в кварцито-пиррофиллитовой толще УССР, показало, что их линзовидная форма — следствие развития процесса будинажа. В данных условиях (фация зеленокаменных сланцев) пластичность кварцитопесчаника немного превышала пластичность пиррофиллитового сланца, хотя при механических испытаниях в лабораторных условиях кварцитопесчаник имеет прочность на сжатие примерно в 10 раз большую, чем пиррофиллит ($3000-4000 \text{ кг/см}^2$ для кварцитопесчаника и всего 420 кг/см^2 для пиррофиллита [4 и др.]).

Учитывая региональность структур будинажа, значительные размеры обособляющих линзовидных пиррофиллитовых тел (будин) и однородный характер их ориентировки, причину возникновения указанных малых структурных форм необходимо связывать с формированием крупных тектонических структур. Автор связывает (по аналогии с ранее рассмотренным примером) причины возникновения столь высокой пластичности кварцитопесчаника с воздействием на породу ориентированного давления, которое проявлялось на фоне всех остальных агентов регионального метаморфизма. Весьма примечательно, что и в этом случае результаты изучения

структурных особенностей кварцитопесчаника на участках пережима мощности пиррофиллитового пласта показывают, что кварцитопесчаник признаков интенсивной пластической деформации не имеет — гранобластовая структура указывает на развитие более позднего процесса — рекристаллизации, стирающей по-видимому, признаки деформационной структуры, связанной с развитием будинажа в данной толще.

Результаты эксперимента

Для уточнения общих закономерностей структурообразования кварцевых пород в условиях метаморфизма были поставлены следующие опыты. Образцы мономинеральных кварцевых пород разной структуры в одних и тех же условиях и режимах сжимали до заданного давления (при соответствующем нагреве и экспозиции). Условия опытов: квазигидростатическое давление 8 кбар, температура — до 1000°С, экспозиция — до 5 час. В камеру высокого давления (диаметр 10 мм, высота 15 мм) вводили 0,01 г насыщенного раствора NaHCO_3 .

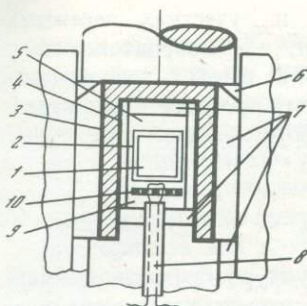
Все опыты проводили в одноступенчатом варианте аппарата типа цилиндр-поршень с внутренним нагревателем [81] (фиг. 26). Отметим, что в аппаратуре указанного типа всегда существует компонента осевого сжатия, не поддающаяся точному учету. По данным [146], она может достигать 25% от приложенного давления. В ходе опытов обнаружилось, что при резком выключении электропитания нагревателя в образце развивается серия трещин отрыва (перпендикулярных оси образца и, следовательно, компоненте осевого сжатия, — трещины упругого последствия). Для уменьшения числа таких трещин температура в камере высокого давления в конце опыта снижалась постепенно (в течение 1,5 час), после снятия температуры постепенно снижалось давление.

В качестве объектов исследования были выбраны: кварцит с четкими признаками пластической деформации (локальных зон из кварцито-мраморных толщ Юго-Западного Прибайкалья) и кварцитовидный песчаник, не обладающий отчетливо видимыми признаками пластической деформации (толкачевский кварцитовидный песчаник, УССР). Опыты проводились на образцах размером 4 × 4 × 4 мм.

Кварцит из локальных зон кварцитовых пропластков кварцито-мраморных толщ Юго-Западного Прибайкалья. Во взятом для опытов кварците слагающие его зерна кварца интенсивно пластически деформированы — имеют вид своеобразных кварцевых полос толщиной до 0,005 мм и длиной до 0,1 мм (таблица V).

Изменение во внешнем облике образца заметны уже в опытах с экспозицией 3 часа: образцы кварцита (серые) после опыта становились молочно-белыми. В шлифах под микроскопом можно видеть, что по границам и внутри исходных пластически деформированных зерен развиваются новые, более мелкие зерна кварца (зародышеобразование) примерно одинаковых размеров — первые тысячные миллиметра (*a*).

Новообразованные зерна не имеют ни волнистого угасания, ни искривленных границ, ни микротрещиноватости (что отмечается в исходных деформационных зернах кварца). Развитие их может идти в двух направлениях: исходное деформированное зерно кварца "распадается" на ряд



Фиг. 26. Схема сборки контейнера с образцом
 1 — образец; 2 — платиновая ампула; 3 — графитовый нагреватель; 4 — трубка из пирофиллита; 5 — объем, заполняемый порошком пирофиллита; 6 — стальное уплотнительное кольцо; 7 — изоляция из пирофиллита; 8 — фарфоровая соломка; 9 — объем, заполняемый порошком горного хрусталя; 10 — пермаллоевый диск, на котором осуществляется горячий спай терморпары

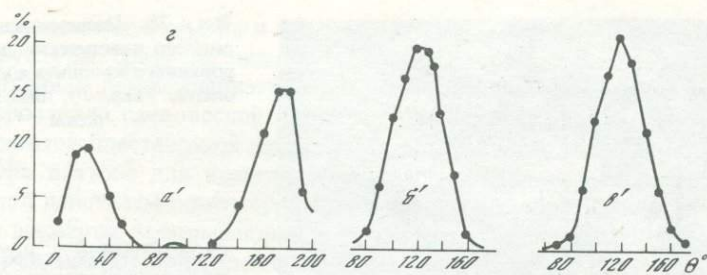
субзерен с близкой ориентировкой или же (чаще) ориентировка (и положение) новообразованных зерен существенно отличается от ориентировки исходных удлинённых зерен. В обоих случаях границы новообразованных зерен ровные, четкие, с характерными тройными точками — узлами на стыках соседних зерен, что указывает на равновесное состояние новообразованной структуры с внешними условиями.

Все приведенные особенности позволяют рассматривать новую мозаичную гранобластовую структуру, возникающую в процессе изменения исходной деформационной, как структуру рекристаллизационную, обусловленную первичной рекристаллизацией.

При экспозиции 5 час. исходная деформационная структура практически полностью (более 80%) замещается агрегатом новообразованных зерен, для которого характерна совокупность зерен различных размеров (в). Преобладающие размеры крупных зерен больше, чем в предыдущем примере, примерно в 2–3 раза (собирательная рекристаллизация); наблюдались элементы вторичной, возникающей в ходе опыта пластической деформации исходных удлинённых зерен кварца. Зависимость интенсивности процесса рекристаллизации от степени вторичной пластической деформации не установлена.

Изучение степени совершенства строения рассматриваемых структур на основе сопоставления кривых распределения двугранных узлов проводилось на образцах, характеризующих: исходный кварцит — структура деформационная (фиг. 27, a'); начальный этап развития гранобластовой структуры — структура, обусловленная первичной рекристаллизацией (b'); полностью рекристаллизованный материал — гранобластовая структура — обусловлен собирательной рекристаллизацией ($в'$). Проведенное изучение показало следующее.

Образец а: границы зерен преимущественно ровные, форма зерен лентообразная; кривая распределения двугранных углов резко отличается от кривой равновесной гранобластовой структуры (a'), максимум при 120° отсутствует, но имеются два максимума — при 30° и 180° ; указанная кривая отражает особенности развития пластической деформации кварцита (об этом сказано особо в разделе о пластической деформации). Образец б: границы зерен преимущественно прямолинейные; преобладающие форма сечения зерен — шести- и пятиугольная; кривая распределения двугранных углов характеризуется нормальным распределением с максимумом при 120° , равным 20% (b'). Образец в ($в'$): границы зерен в основном прямо-



Фиг. 27. Кривые распределения двугранных углов

$a' - b'$ — кривые, характеризующие особенности структуры образцов $a - b$ (таблица V)

линейные; форма сечения зерен преимущественно шести- и пятиугольная; кривая распределения величин двугранных углов (максимум 22%), как и аналогичная кривая участка b' , однозначно приближается к равновесной кривой (фиг. 1).

Опытами установлено, что в обстановке негидростатического сжатия в ходе перестройки исходной структуры весьма совершенная равновесная мозаичная гранобластовая структура, обусловленная рекристаллизацией, возникает сразу, минуя возможные предварительные стадии развития [51].

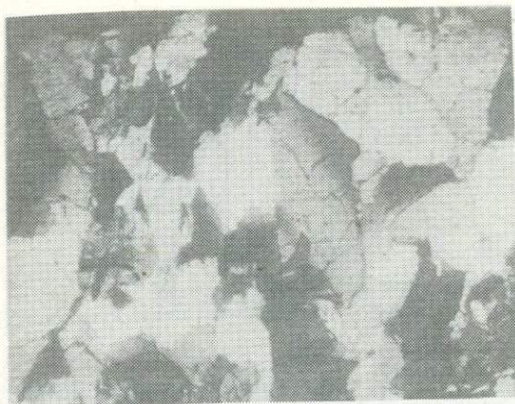
Проведенные дополнительные опыты по рекристаллизации пластически деформированного кварцита в условиях атмосферного давления (при температуре до 900°C и экспозиции от 5 час. и более) показали отсутствие явлений зародышеобразования (первичной рекристаллизации) в исходном деформированном материале. Отмечалась лишь одна из возможных стадий возврата — полигонизация (под возвратом понимаются все изменения тонкой структуры, при которых размеры и форма слагающих ее индивидов не меняются). В данном случае, как в металлах и сплавах, полигонизация проявлялась в разделении индивидов структуры на субзерна, что отчетливо видно в правой части фиг. 28.

Толкачевский кварцитовидный песчаник (УССР). До опыта кварцитопесчаник представлял собой мелкозернистую сливную породу преимущественно теплого розового цвета; микроскопическое описание породы было приведено выше, как и результаты изучения ее структурных особенностей.

После опыта в кварцитопесчанике изменения заметны макроскопически: исходные образцы розового цвета становятся белесыми. Под микроскопом в шлифах отмечается изменение исходной структуры кварцитопесчаника: развиваются уплощенные зерна кварца, вытянутые в направлении, перпендикулярном компоненте осевого сжатия (удлинение зерен до 3:1—4:1). Границы зерен извилистые, взаимопроникающие. Закономерное удлинение зерен, резко полосчатое угасание в удлиненных зернах, локальные ореолы напряжений на стыках соседних зерен, характерные искривленные границы и отмечаемый в отдельных случаях по границам закономерно удлиненных зерен мелкогранулированный кварцевый материал — все эти элементы однозначно указывают на пластическую деформацию, развивающуюся в кварците в условиях опыта.

Развитие пластической деформации приводит к возникновению не

Ф и г. 28. Полигонизация природного пластически деформированного кварцита в условиях опыта. Увел. 70, нолики скрещены



свойственной исходному кварцитопесчанику структуры, которую можно считать деформационной (таблица VI, б).

Примененная аппаратура не позволяет полностью выявить пластическую деформацию, наблюдаемую в природных условиях. Это приводит к тому, что при увеличении экспозиции свыше 5 час. деформированные в условиях опыта зерна кварца исходной породы приобретают резко выраженное мозаичное угасание. В пределах удлиненных зерен появляются участки блоковой, полигональной структуры. Отдельные блоки весьма слабо (первые градусы) разориентированы относительно друг друга, что при вращении столика микроскопа наглядно видно. В дальнейшем наблюдается рекристаллизация — возникает мозаичная гранобластовая структура. Как и в ранее рассмотренном примере (таблица V), процесс начинается в наиболее напряженных, деформированных участках — на стыках зерен. Это отчетливо устанавливается по "реликтам" деформированных зерен, заключенных в новообразованной равномернозернистой массе.

Как показывают результаты изучения морфологических признаков, исходный кварцитовидный песчаник обладал суммой признаков, характерных для гранобластовых структур, встречаемых в породах этого типа (фиг. 24).

Новообразованная деформационная структура имеет следующую характеристику. Границы зерен преимущественно криволинейные. Преобладающая форма зерен в плоских сечениях — четырех- и пятиугольная. Кривая распределения двугранных углов имеет максимум при 120° , равный всего 11%. Наличие дополнительных максимумов на кривой (50 и 180°), наиболее четко наблюдаемых при интенсивной пластической деформации (фиг. 27, а), достаточно определенно указывает на отличие данного распределения двугранных углов от типичного для мозаичных гранобластовых структур.

По морфологическим особенностям новообразованная гранобластовая структура, обусловленная рекристаллизацией, аналогична рассмотренным в предыдущем примере равновесным гранобластовым структурам (в'). Границы зерен преимущественно прямолинейные. Преобладающая форма зерен кварца в плоских сечениях шести- и пятиугольная. Кривая распределения двугранных углов имеет четкий максимум при 120° (максимум 22%).

Результаты проведенных опытов. Опыт 1. В ходе опыта в условиях ква-

зигдростатического сжатия в кварците весьма совершенной деформационной структуры сразу возникает равновесная гранобластовая структура, обусловленная рекристаллизацией. При увеличении экспозиции опыта по сформированной равновесной гранобластовой структуре отмечается развитие элементов пластической деформации. Опыт 2. Исходная гранобластовая структура взятого для исследования кварцитовидного песчаника в ходе опыта под действием ориентированного сжатия приобрела отчетливо выраженные элементы деформационной структуры, фиксируемые не только результатами микроскопического изучения, но и данными полуколичественного изучения морфологических признаков. Поскольку в условиях опыта в полной мере не могла развиваться пластическая деформация, возникшая деформационная структура при увеличении экспозиции сменилась равновесной весьма совершенной гранобластовой структурой, обусловленной рекристаллизацией.

Морфологические характеристики полученных в различных опытах гранобластовых структур однотипны; морфологические признаки деформационных структур природного и искусственного агрегата подобны. Поведение агрегата зерен с неметаллическим типом связей в рассматриваемом примере морфологически не отличается от поведения металлов и сплавов в соответствующих условиях (деформация, полигонизация, рекристаллизация первичная, рекристаллизация собирательная и вторичная).

Весьма важный результат проведенного исследования: в одних и тех же условиях опытов в исходных образцах кварцевых пород, характеризующихся различными структурами, возникали новые структуры, не связанные со структурами исходными; в образцах недеформированного кварцитовидного песчаника после опыта наблюдалась деформационная структура, в образцах природного пластически деформированного — гранобластовые структуры. Изменение структуры происходило не путем приспособления отдельных зерен агрегата к новым условиям, как при литификации породы, а путем коренной перестройки исходной структуры (вследствие согласованного формоизменения зерен агрегата или новообразования агрегата зерен).

Результаты проведенных опытов однозначно показали, что соотношение энергии упругих напряжений (в данном случае — энергии остаточных упругих напряжений) и внешнего воздействия предопределяет пути и механизмы становления стационарного состояния кристаллической породы в новых, изменившихся условиях. В зависимости от энергетического состояния исходной породы в одном случае образовалась равновесная гранобластовая структура, что вполне отвечает существующим представлениям об уменьшении запасенной при пластической деформации породы упругой энергии (энергии упругих напряжений и искажений кристаллических структур индивидов деформированного агрегата). В другом случае по гранобластовой, в принципе равновесной структуре образуется структура деформационная, т.е., согласно существующим представлениям, в породе повышается уровень упругой энергии. С позиций существующих представлений это не совсем ясно: стационарное состояние одного и того же материала в одних и тех же условиях должно быть одинаковым и, в принципе, структурные признаки пород в этих условиях также должны быть одинаковыми, а не различными, как в рассматриваемых опытах.

Приведенный пример достаточно убедительно показывает, что отсутствие

ясного понимания природы процесса структурообразования горной породы позволяет широко использовать построения, односторонне характеризующие рассматриваемые явления. Уточнению физической природы процессов пластической деформации и рекристаллизации на примере существенно кварцевой породы и посвящены последующие разделы работы.

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ МЕТАМОРФИЗОВАННЫХ КВАРЦЕВЫХ ПОРОД

Пластическая деформация поликристалла — комплекс явлений, развивающихся под влиянием внешнего механического воздействия и предопределяющих изменение структурных особенностей поликристаллического материала и его физико-механические свойства. Обратимся к результатам непосредственного изучения деформационных структур металлов и сплавов (в терминах металлофизики — текстур деформации).

При деформации поликристалла, сложенного упруго-анизотропными индивидами, обладающими определенной анизотропией физико-механических свойств, возникает преимущественная ориентировка одного или нескольких кристаллографических направлений, разных для различных материалов, но однозначно, несмотря на некоторое рассеяние, ориентированных вдоль оси сжатия или растяжения. Это связывается со скольжением, появление которого объясняется законом постоянства касательных напряжений.

Для геологов упорядочение пространственного положения известно по результатам изучения микроструктурным методом оптической ориентировки интенсивно деформированных кварцевых пород — кварцевых тектонитов [66 и др.]. Однако физическая природа явления оставалась и в случае кварцевых пород недостаточно определенной, в связи с чем в настоящее время значительно ослаб интерес к микроструктурному анализу.

Подмена физической сущности пластической деформации кварца и кварцита гипотетическими построениями [153 и др.], моделями термодинамически устойчивых ориентировок [119], как и результаты эмпирического решения частных геологических задач [66 и др.], не способствовали успешному решению проблемы пластической деформации поликристаллического агрегата, сложенного упруго-анизотропными индивидами.

Экспериментальным подтверждением возможности проявления пластической деформации у кварца следует считать опубликованную в 1933 г. работу Е.В. Цинзерлинг и А.В. Шубникова [101], посвященную дофинейскому двойникованию кварца. Значительно позже были опубликованы работы, в которых рассматривалась пластическая деформация агрегата кварцевых зерен [28, 30, 121, 122 и др.]. Особенности пластической деформации монокристалльного кварца в условиях опыта были рассмотрены вскоре после опубликования указанных работ [31, 32, 139 и др.]. Несмотря на увеличивающееся число публикаций, посвященных отдельным аспектам пластической деформации кварца и кварцита, как в условиях опыта, так и в природных условиях, особой ясности в данной проблеме еще нет.

В принципе сказанное выше отражает общее положение в физике пластичности кристаллов, хотя хорошо известно, что в монокристаллах пластическая деформация чаще всего происходит путем скольжения. Но отдельные пачки отдельных атомных слоев скользят не в том направлении, в ка-

ком приложена сила. Не наблюдается однозначной привязки к отдельным структурным направлениям кристалла, в котором атомы упакованы плотнее всего. Практически невозможно, исходя из существующих представлений о структуре материала, теоретически предсказать особенности его пластической деформации. Естественно, что вопрос пластической деформации поликристаллов освещен еще в меньшей степени.

Результаты проведенного в данной работе уточнения особенностей развития пластической деформации при развитии внутризеренных микродеформационных структур, а также при литификации осадочных пород (начальная стадия процесса пластической деформации высокопористого агрегата; фиг. 16), достаточно отчетливо показали, что в существующих представлениях о пластической деформации кристалла и поликристалла явно недооценивается роль анизотропии связей кристаллической структуры отдельного индивида, особенностей реакции индивида на изменение внешних условий.

Более углубленное изучение особенностей развития пластической деформации метаморфизованной песчаной породы и выявление геологической сущности этого явления, по мнению автора, целесообразно проводить следующим образом: детально изучить пластическую деформацию кварца и кварцита в условиях опыта, полученные результаты дополнить и уточнить данными изучения природных объектов. В такой последовательности в разделе и приводятся результаты изучения.

Экспериментальное изучение причин развития деформационных структур кварцевых пород

Уточнение причин, контролирующих возникновение и развитие деформационных структур кварцевой породы в условиях опыта, сводилось к выяснению основных закономерностей развития: пластической деформации кварца и деформационных структур в искусственно полученных кварцевых породах.

Пластическая деформация кварца

С целью более полного выявления особенностей пластической деформации кварца она изучается и в условиях стабильного существования кварца (начальная стадия пластической деформации), и в условиях его метастабильности (сверхвысокие давления и высокие температуры).

Пластическая деформация кварца под действием ориентированной нагрузки (до 3,5 кбар).

Исходный материал. В качестве исходного материала был использован искусственный весьма совершенный оптический (бездислокационный) монокристалл кварца, предоставленный для исследования В.С. Хаджи (ВНИИСИМС). По данным рентгенотопографического исследования (метод Ланга), плотность дислокаций в исходном кварце менее 10 см^{-2} . Отсутствие блочности и закономерного расположения единичных дислокаций дает основание утверждать, что в исходном кварце пластическая деформация отсутствовала.

Просмотром под электронным микроскопом ряда реплик, взятых со сколов исходного кварца, также не обнаружены дефекты, которые указы-

вали бы на пластическую деформацию кристалла (в отдельных случаях под электронным микроскопом фиксировалось лишь развитие локальных искажений поверхностей скола). Из исходного материала были выпилены образцы кубической формы размером 7x7x7 мм с точной привязкой к кристаллографическим осям исходного монокристалла.

Методика исследования. Опыты проводились в примененном ранее одноступенчатом варианте аппарата типа цилиндр-поршень с внутренним нагревателем. В аппаратуре такого типа всегда существует компонента осевого сжатия. Ее влияние на структурные особенности кварцитов в условиях опытов, проводящихся на данной аппаратуре, показана на таблице VI. Опыты проводились при следующих параметрах: квазигидростатическое давление 15 кбар, температура до 550°С, экспозиция 10 мин. В камеру высокого давления (диаметр 10 мм, высота 15 мм) вводилось 0,01 насыщенного раствора NaHCO_3 .

Режим опытов: после быстрого (2–3 мин.) подъема давления (в течение 1 часа) поднималась температура до заданной; выдержка при 550°С составляла 10 мин.; с целью уменьшения растрескивания температура плавно (в течение 2 час.) снижалась до 100°С и в течение такого же времени плавно снималось давление.

Несмотря на принятые меры, образец распадался на ряд пластинчатых фрагментов обычно по двум-трем трещинам, ориентированным перпендикулярно компоненте осевого сжатия. Исследование образцов после опытов проводилось только на указанных пластинчатых фрагментах (характеризующих, подчеркнем еще раз, сечения, перпендикулярные направлению действовавшей компоненты осевого сжатия). Деформированные образцы изучались макроскопически, под оптическим и электронным микроскопами, и с помощью одного из методов рентгеновской топографии — метода Фудживара.

Для получения более полного представления о деформации кристалла под действием ориентированной нагрузки кубические образцы исходного кварца различным образом ориентировались: образец 1 — компонента осевого сжатия параллельна оси y , перпендикулярна ($10\bar{1}0$); образец 2 — компонента осевого сжатия перпендикулярна плоскости ромбоэдра ($10\bar{1}1$); образец 3 — компонента осевого сжатия параллельна оси z , перпендикулярна (0001) (в опытах 1–3 соответственно).

Результаты опытов [38]. Макроскопическим просмотром пластинчатых фрагментов образцов после опытов, проведенных в указанном выше режиме, установлено, что образцы так же бесцветны, равномерно водяно-прозрачны, имеют тот же стеклянный блеск, что и образцы из исходного материала.

Проведенное различными методами изучение пластинчатых фрагментов образцов показало следующее.

Макроскопическое изучение поверхностей отрыва. Образец 1 (сечение zx): поверхности отрыва фрагментов неровные, несколько выпуклые с одной стороны и вогнутые — с другой. Наиболее сложные поверхности отрыва наблюдаются в пластинчатом фрагменте из средней части образца. Здесь на общем фоне искривленной поверхности отчетливо выделяются скульптурные зоны с сериями ручьевидных трещин, а также группа различно ориентированных ступенек (высота сту-

пенек менее 0,1 мм, протяженность от 1 мм и более). Подобные зоны ступенчатых склонов могут быть четко ориентированы в одном направлении, но не обязательно развиваются прямолинейно; большинство контуров ступеней плавно изгибаются.

Четкую, однозначную кристаллографическую привязку всех указанных элементов скульптурных поверхностей отрыва фрагмента к кристаллографическим осям исследуемого образца однозначно осуществить трудно.

Образец 2. Поверхности отрыва пластинчатых фрагментов аналогичны ранее рассмотренным. Но все отмеченные для фрагментов образца 1 скульптурные элементы поверхностей отрыва здесь выражены более четко. Новое здесь — серия изгибающихся, практически вертикальных трещин в центре фрагмента.

Образец 3. Скульптурный облик поверхностей отрыва пластинчатых фрагментов наиболее сложный, особенно для фрагментов средней, деформированной части образца. Рельеф поверхности отрыва (при общей искривленности) обусловлен сериями черепитчато налегающих друг на друга слоев (мощностью менее 0,1 мм), предопределяющих развитие ступенеобразных поверхностей отрыва. Ступенеобразный рельеф на локальных участках проявляется различно и по интенсивности, и по ориентировке относительно осей x , y , z образца.

Более сложный характер рельефа поверхностей отрыва фрагментов служит определенным указанием на наиболее интенсивную деформацию образца 3 в условиях опыта.

Х а р а к т е р д в о й н и к о в а н и я. В пластинчатых фрагментах, протравленных смесью азотной и плавиковой кислот, обнаруживаются двойниковые индивиды (благодаря различной ориентации фигур травления в двойниковых индивидах). Результаты изучения этих фрагментов следующие.

Образец 1. В пластинчатом фрагменте толщиной 1,5 мм, взятом в области наименьшей деформации (в торцевой части образца под поршнем), травлением на общем фоне выделены два индивида размерами порядка $0,5 \times 0,5$ мм (границы индивидов преимущественно прямые). Двойниковые индивиды верхней и нижней поверхностей пластинчатого образца между собой по форме не сопоставимы. В аналогичном пластинчатом фрагменте средней части образца (которую можно рассматривать как наиболее деформированную) после протравливания на общем фоне выявляются два индивида примерно равной величины (размером 3×3 мм). Границы индивидов на локальных участках различны — от прямых до криволинейных. Примечательно, что форма индивидов одной плоскости фрагмента также не соответствует форме индивидов на противоположной параллельной плоскости (толщина фрагментов $\sim 1,5$ мм).

Образец 2. В пластинчатых фрагментах образца этого опыта двойники не обнаружены.

Образец 3 (сечение, перпендикулярное оси z). Изучение показало, что в пластинчатом фрагменте торцевой части образца развиты два индивида; площади двойников примерно равны (таблица VII, a и a'). Во фрагменте из наиболее деформированной части образца площадь двойникового индивида в центре значительно меньше, чем в первом случае (b и b'). Примечательно, что в средней части этого двойника, судя по фигурам травле-

ния, развиты локальные области, ориентированные несколько иначе, чем сам индивид (b и b').

Как и в случае фрагментов образца 1, двойниковые индивиды верхней и нижней поверхностей пластинчатых фрагментов образца 3 между собой однозначно не сопоставимы.

При поляризационно-оптическом изучении в шлифах, приготовленных из пластинчатых фрагментов образцов, в которых в условиях опыта ориентированное усилие было приложено перпендикулярно одной из призм первого рода (опыт 1) и плоскости ромбоэдра (опыт 2), отчетливые признаки пластической деформации не обнаружены; в таких образцах отмечалось лишь появление очень слабого аномального облачного угасания. Более отчетливо это явление наблюдалось в краевых зонах пластинчатого фрагмента из центральной зоны образца 3 (ориентированное давление перпендикулярно плоскости пинакоида). В этих зонах в кварце отмечены локальные участки, характеризующиеся слабой двуосновностью $2V = 1-2^\circ$ (замерено по методике В.П. Петрова [6]).

Изучение особенностей двойникового под микроскопом показало, что двойники, как правило, оптически не выявляются; разнонаправленное вращение плоскости поляризации не установлено. Это указывает на то, что рассматриваемые двойники образованы по дофинейскому закону. Исключение составляют двойниковые индивиды пластинчатого фрагмента центральной части образца 3 (зоны интенсивной деформации b и b'). У них не отмечается взаимная параллельность оптических солей (что характерно для дофинейских двойников), сдвойникованные области, судя по положению оптических осей индивидов, разориентированы относительно друг друга на угол до 5° . Последнее может указывать на возможность развития иррационального двойникового.

Электронно-микроскопическое изучение пластинчатых фрагментов образцов кварца после опытов в условиях сжатия проводилось методом реплик, при котором на тонкой целлюлозной пленке рассматривается отпечаток (реплика), снятый с поверхности образца. Реплика прозрачна для электронного луча и хорошо воспроизводит микродетали рельефа поверхности. Для изучения кварцитов применялись одноступенчатые угольные реплики. Поверхности пластинчатых фрагментов кварца предварительно не протравливались.

При просмотре под электронным микроскопом реплик, приготовленных с поверхностей отрыва пластинчатых фрагментов образцов 1 и 2, были встречены лишь локальные участки слабо искривленной поверхности. Они имеют вид субпараллельных тонких полос шириной до десятых долей микрона. В одних случаях эти скульптурные элементы едва намечаются, в других отчетливо видно закономерное волнообразное искривление поверхности, и тогда они напоминают известные "знаки ряби". Были также встречены связанные с отмеченными локальными искажениями волокна кварца.

При ориентировке компоненты осевого сжатия перпендикулярно плоскости ромбоэдра (опыт 2) отмеченные скульптурные элементы в кварце проявлены более отчетливо (и несколько интенсивнее).

Изучение реплик с поверхностей отрыва пластинчатых фрагментов образцов, в которых компонента осевого сжатия ориентирована парал-

лельно оси z (образец 3), показало, что, помимо скульптурных элементов типа отмеченных в предыдущих образцах в этом образце развиты участки с весьма характерным и своеобразным рельефом. Особенно наглядны они на поверхностях фрагмента из средней зоны образца (зона наибольшей деформации). Один из таких участков приведен на таблице VIII, *a*. На снимке отчетливо выделяются три различающиеся между собой зоны (*A*, *B*, *B*).

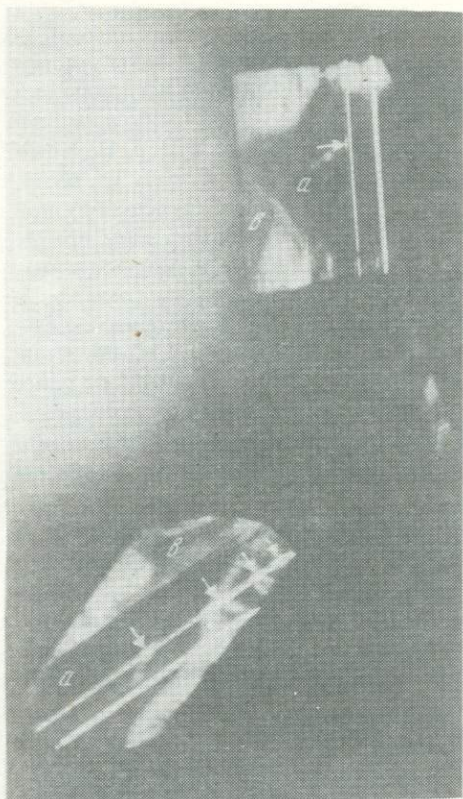
Скульптурный облик нижней зоны (*A*) обусловлен ступенеобразной поверхностью (проявление "ступеней" на различных участках зоны при их однородной ориентировке различно по интенсивности и морфологии). В сечениях, перпендикулярных поверхности со ступенеобразным рельефом, видны серии темных и светлых полос шириной в сотые доли микрона (зона *A*, 1). Диагонально расположенная зона *B* (мощность до 2 м) представляет собой серию таких же темных и светлых полос. Ее отличие от ранее рассмотренных лишь в интенсивности развития и ориентировке относительно поверхности образца. Участок *B* в верхнем левом углу (*a*) также представляет собой серию аналогичных полос, но ориентированных в другом направлении.

Взаимное сопоставление различных сечений зоны *A* (*a*) позволяет в первом приближении считать рассматриваемые серии полос сериями микрополос скольжения (в терминах дислокационных представлений — сериями полос сдвига). По морфологическим особенностям развития серий микрополос скольжения (типа *b*) их можно относить к явлениям типа сбросообразования, вернее (учитывая масштабы) — к явлениям микросбросообразования.

Нарушения параллельности микрополос типа отмеченных на фиг. *b* стрелками, случаи их "выклинивания", однозначно указывают на возможность развития незавершенных атомных плоскостей в этих зонах. Последнее (наличие краевых дислокаций) дает основание говорить о дислокационном механизме, лежащем в основе пластической деформации.

В тонких пластинках рассматриваемого образца, пришлифованных и протравленных затем в смеси азотной и плавиковой кислот, отчетливо проявляется дислокационная структура в форме бугорков травления, что подтверждает высказанные выше представления. Порядок расположения бугорков и интенсивность их проявления на различных участках могут быть различны — от единичных бугорков травления до упорядоченных, закономерно ориентированных рядов (таблица IX). В последнем случае пластическая деформация менее наглядна, поэтому в последующих опытах изучение пластической деформации под электронным микроскопом проводилось только на непротравленных сколах образцов.

Для уточнения природы отмеченных выше явлений пластической деформации в кварце был применен один из методов рентгеновской дифракционной микроскопии (рентгеновской топографии) — метод Фудживара. Разрешающая способность этих методов ниже разрешающей способности электронной микроскопии и приближается по порядку к оптической. Но достоинство их в том, что они позволяют без разрушения образца выявить такие особенности микроскопического строения кристаллических тел, какие недоступны при других методах. В частности, можно обнаружить различного рода несовершенства строения реальных кристаллических тел (получение изображения несовершенства обус-



Ф и г. 29. Интерференционные пятна, полученные методом Фудживара от пластинки кварца, взятой из средней части образца 3. Пояснения в тексте

ловлено" ... различием между интенсивностью лучей дифрагированных несовершенными и совершенными областями решетки" [94]).

Для решения поставленной задачи метод Фудживара наиболее перспективен, так как он позволяет установить присутствие разориентированных областей субструктуры, величину углов дезориентации между ними и т.д. Изучение проводилось на пластинчатом фрагменте из наиболее деформированной (средней) части образца 3, поверхность подготовленного образца протравливались смесью азотной и плавиковой кислот.

Съемка была проведена В.Г. Лютцау на аппарате "Марс-1" (трубка БСВ-5, излучение меди). Расстояние образец — пленка 200 мм, расстояние источник—об-

разец 70 мм. Центральная часть пучка перпендикулярна оси образца.

На фиг. 29 показана часть рентгеновской топографической картины образца, полученной в расходящемся пучке смешанного (белого и характеристического) излучения. Каждое интерференционное пятно образовано белым излучением, и на его фоне видны темные линии характеристического излучения анода. Результаты анализа интерференционных пятен следующие. В центре дифракционных пятен видна светлая неотражающая область (а), что свидетельствует о том, что в центре кристалла находится участок, развернутый относительно основного кристалла на значительный угол. В остальных частях образца наблюдается картина иного рода. Нарушение регулярности структуры проявляется в форме малоугловых границ и отражений отдельных взаимно дезориентированных блоков. Размеры блоков — десятые доли миллиметра, углы дезориентации 2–7 мин.; границы блоков не всегда четкие и в большинстве случаев не прямолинейные. Ориентировка длинных осей блоков субструктуры не связана однозначно с направлением осей x и y монокристалла кварца.

Рассмотрение особенностей линий характеристического излучения показывает следующее. На топографических пятнах видны линии: жирная — слившийся дублет K_{α_1} , K_{α_2} и более слабые — K_{β_1} и K_{β_2} , разрешенные между собой. Эти линии вблизи поверхности кристалла (в темных участках суб-

структуры) примерно в 1,5 раза расширены (на фиг. 29 указано стрелками). Примечательно, что этот эффект наблюдается и в зоне контакта со сдвойникованной областью (это отчетливо видно на нижнем интерференционном пятне фиг. 29) и, что особенно важно, в центральной части сдвойникованной области. Отмеченное свидетельствует о значительной плоскости дислокаций в указанных областях и деформационном характере происхождения дислокаций.

В целом рентгеновская топографическая картина позволила осуществить не только прямое наблюдение остаточной деформации в решетке исходного бездислокационного кварца после опыта, но и впервые показать особенности ее распределения в образце. На основании последнего можно утверждать, что в ходе опыта в кварце идет развитие двух процессов — двойникование и образование субструктуры (состоящей из дезориентированных блоков размерами в доли миллиметра), которые и составляют сущность начальной стадии развития его пластической деформации (примечательно, что образование субструктуры однозначно не связано с габитусными формами кварца).

Выше отмечалось, что с развитием деформации площадь двойников уменьшается и увеличивается область развития субструктуры. Этот факт позволяет считать, что именно развитие субструктуры лежит в основе пластической деформации кварца; изменение площади сдвойникованных областей объясняется особенностями ориентировки их упругих модулей в поле внешних сил [127 и др.].

В заключение отметим, что, несмотря на присутствие в камере высокого давления паров насыщенного раствора NaHCO_3 , при развитии пластической деформации вхождение группы OH в структуру кварца не наблюдается (по данным ИК-спектроскопии; Е.С. Рудницкая, ИГЕМ АН СССР).

Пластическая деформация кварца при сверхвысоких (до 140 кбар) давлениях и температурах. В геологической литературе распространено представление о существовании зон сверхвысоких давлений в условиях регионального метаморфизма [80 и др.], и данные о пластической деформации кварца в этих условиях (в условиях его метастабильности) необходимы. Ниже приведены результаты пластической деформации кварца в области термодинамической устойчивости плотных модификаций кремнезема (козита и стишовита) [32].

Исходным материалом для исследования служили хорошо образованные монокристаллы природного бездефектного кварца. Из кварцевого кристалла изготавливались цилиндрические образцы (таблетки) высотой 2,5 мм и диаметром 4 мм. Оптическая ось кварца в большинстве образцов располагалась параллельно оси цилиндра (поскольку в предыдущей серии опытов было показано, что элементы пластической деформации кварца в этом случае проявляются более отчетливо).

Для получения высоких температур в камере высокого давления применялся внутренний нагрев. Образцы помещались в центре миниатюрной графитовой печи сопротивления, имеющей вид трубки, закрытой с торцов графитовыми пробками. Печь с образцом помещалась в камеру высокого давления, футеровка которой выполнялась мелкозернистым плотным извествяком ($\rho = 2,65 \text{ г/см}^3$). Температура определялась по величине подводимой к нагревателю мощности на основании независимых калибровок

с помощью термопар, горячие спаи которых помещались на поверхности кварцевых образцов в различных зонах: на торцах ("холодная" зона) и на образующей цилиндр в среднем сечении нагревателя ("горячая" зона). Точность измерения температуры $\pm 5-7\%$.

Калибровка камеры по давлению (установление соотношения между давлением в камере и величиной нагрузки, развиваемой прессом, в которой эта камера помещена) проводилась в соответствии с существующей практикой по наблюдению скачков электросопротивления, сопровождающих полиморфные переходы в так называемых реперных металлах: висмуте, таллии, барии. Точность измерения давления $\pm 8-10\%$.

Давление выше 89 кбар оценивалось, как обычно, с помощью графической экстраполяции калибровочной прямой, выражающей зависимость между давлением в камере и нагрузкой, развиваемой прессом. Образец кварца в графитовом нагревателе подвергался сжатию, и после установления в камере квазигидростатического сжатия нужной величины (с весьма небольшой компонентой осевого сжатия, величина которой не поддается точному определению) включался нагрев.

После экспозиции при заданной максимальной температуре (занимавшей в отдельных опытах от десятков секунд до десятков минут) сначала снижался нагрев, затем камера охлаждалась (в спокойном воздухе) ниже температуры 100° и снижалось давление. Уменьшение нагрева проводилось также ступенями (обычно в три ступени), но быстрее, чем подъем.

Весь цикл: подъем мощности — выдержка при максимальной температуре — снижение мощности до нуля занимал от 8—12 (в большинстве опытов) до 40—70 мин. (в отдельных, в особенности низкотемпературных опытах).

В камеру не вводилась ни вода, ни какие-либо минерализаторы. Однако графит нагревателя, имевший эффективную пористость 19,44% (истинная пористость 22,69%), и известняк с эффективной пористостью 4,38% (истинная 6,36%) вакуумированию или какой-либо другой специальной обработке не подвергались; содержание воды в графите и известняке составляло 2,56 и 1,72% соответственно. Судя по результатам наших исследований, проводившихся со слюдами, разгерметизация камеры высокого давления не наблюдалась.

Петрографические данные. В образцах кварца, подвергшихся описанной выше обработке, можно было наблюдать следующие проявления пластической деформации: тонкие субпараллельные линии, напоминающие деформационные полосы; к ним в ряде случаев были приурочены мелкие закономерно повторяющиеся участки локального изменения оптической ориентировки; зоны, в пределах которых оптическая ориентировка изменялась относительно плавно; участки, на которых наблюдалась оптическая переориентировка кварца, внешне подобная двойникованию.

Деформации первого вида в кварцевом материале со слабым волнистым угасанием и отчетливо выраженной дуосностью морфологически проявляется в виде деформационных полосок (мощностью до 0,002 мм каждая, протяженностью до 2 мм). Обычно они встречаются не одиночно, а сериями.

Просмотр открытых шлифов с применением имперсионных жидкостей,

снимающих фазовый контраст, показал, что локальное периодическое изменение оптической ориентировки вдоль границ рассматриваемых полос обусловлено развитием закономерного ориентированных (перпендикулярно простиранию) мелких оперяющихся трещинок (мощность и протяженность — тысячные доли миллиметра). Приведенные данные свидетельствуют о том, что эти серии полос являются полосами скольжения, возникшими в результате деформации образца.

Второй пример деформации, наблюдавшийся в наших опытах, иллюстрирует таблица IX, на которой (внизу) приведена фотография шлифа (снятого в поляризованном свете). Шлиф вырезан параллельно оси образца. В этом опыте давление было 135 кбар, максимальная температура $1500 \pm 75^\circ$, время температурного цикла 35 мин; белая оторочка по контуру шлифа — агрегат новообразованных плотных модификаций кремнезема, известных под названиями коэзит и стишовит (к предмету настоящего исследования это прямого отношения не имеет). В средней верхней части шлифа (А) располагается кварц неизменной оптической ориентировки. Оптическая ось кварца в этой области расположена в плоскости снимка примерно вертикально. Кварц с отчетливо выраженным волнистым угасанием слабодвуосен; более точно измерить $2V$ не удалось из-за его небольшого значения и неудачной оптической ориентировки образца.

Слева внизу светлыми пятнами выделяются три вертикальные зоны (шириной до 0,07 мм) с измененной оптической ориентировкой (Б). Зоны отделяются друг от друга узкими, вертикальными (на фигуре темными) полосами, которые не являются трещинами, а представляют собой серии (пакеты), состоящие из нескольких (до 10) субпараллельных линий (мощностью до 0,001 мм каждая). Судя по различной оптической ориентировке кварца по обе стороны пакетов, их можно считать проявлением следов плоскостей скольжения. Этот вывод подтверждается и тем, что упомянутые пакеты (серии) субпараллельных линий рассекают отдельные трещины, встречающиеся на участках их развития.

Изучением оптической ориентировки кварца в пределах рассматриваемых зон на столике Федорова определен характер ее изменения. В крайних участках зон (слева) отмечается весьма четкое проявление двуосности минерала; угол оптических осей здесь достигает $2V = (+) 84^\circ$. У противоположных (правых) границ зон наблюдается более или менее постоянный переход к кварцу с неизменной ориентировкой. На фиг. Б это прослеживается по плавному переходу белого (сильное двупреломление) кварца зон с измененной ориентировкой в более темный (погашенный) кварц основного поля образца.

Картина, соответствующая деформации третьего вида, изображена на участке В. Посредине шлифа справа видна система темных субпараллельных субгоризонтальных полос, развивающихся и по области кварца неизменной ориентировки, и частично по светлым зонам участка Б, рассмотренным выше. Темные полосы кварца с измененной ориентировкой (мощностью до 0,4 мм) располагаются примерно перпендикулярно компоненте осевого сжатия. Измерение на Федоровском столике показало, что в рассматриваемых полосах кварц отчетливо двуосен, но вследствие неудачной ориентировки сечения измерить угол оптических осей не удалось. В отличие от исходного кварца зоны А, где ось N_p лежит в плоскости

шлифа, здесь она к плоскости шлифа наклонена под углом 45° . Поэтому рассматриваемые полосы хорошо видны в шлифе, а по форме их проявления внешне похожи на двойники (пример иррационального двойникова).

При дальнейшем исследовании изучим оптическую ориентировку выделенных участков, проведем электронно-микроскопическое и рентгенографическое исследование кварца деформированных зон.

На диаграмме оптической ориентировки кварца участка *Б* можно отметить поворот индикатрисы (относительно основного поля кварца) и изменение ее формы. Угол оптических осей здесь колеблется от 83 до 90° , в среднем (+) $2V = 84^\circ$. Сравнивая между собой все эти участки, можно видеть, что пластическая деформация кварца отразилась на диаграммах оптической ориентировки и в различной ориентировке оптической индикатрисы кварца относительно направления действующей компоненты осевого сжатия, и в изменениях формы индикатрисы.

Предварительное электронно-микроскопическое изучение реплик нескольких сколов исходного недеформированного кварца показало, что в нем наблюдаются обычные для кварца сколовые поверхности (отдельные рудьевидные трещины, быстро затухающие в кварцевом материале, встречаются).

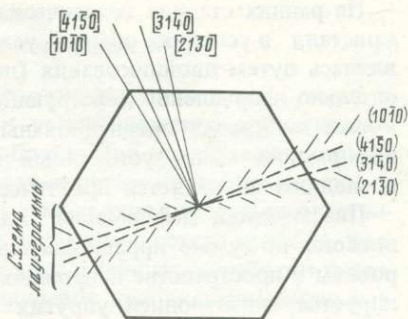
Признаки деформации, наблюдаемые в репликах, взятых с различных поверхностей скола искусственно деформированного образца кварца, можно разбить на два типа. Первый тип — трещины, аналогичные встреченным в исходном кварце, но развитые более интенсивно. Второй тип деформации встречается реже, проявляется в виде своеобразной гофрировки — системы ступенчатых сколов и субпараллельных поверхностей со следами возможного смещения слоев (блоков) кварца.

Рентгенографическому исследованию была подвергнута взятая из деформированного образца пластинка, охватывающая кварц зоны *А* (таблица IX) и кварц зоны *Б*, характеризующийся наибольшей величиной угла оптических осей. Участок, из которого был взят образец, был выбран для исследования из-за наиболее четкого (судя по углу оптических осей) проявления пластической деформации. Все диаграммы были получены в камере РКОП на Мо-излучении.

На лауэграммах кварца основного поля образца (*А*), как и на лауэграммах исходного кварца, каких-либо признаков деформации не отмечается. Лауэграмма, снятая при произвольной ориентировке кварца участка *Б*, показала, что ряд кристаллографических зон дает на снимке непрерывные полосы рассеяния, прочеркивающие их. Известно, что если подобные полосы связаны с наличием микротрещин, то при монохроматическом излучении они не видны, в то время как полосы, связанные с закономерными двумерными нарушениями атомного порядка, проявляются и при монохроматическом излучении. Для расшифровки этого явления был сделан снимок при монохроматическом излучении (кристалл-монохроматор — сорбитол гексаацетат). Прочерченность зон не проявилась. Это указывает на то, что данный эффект связан с микротрещинами. Индексирование лауэграмм показало, что трещины, по-видимому, образуются параллельно кристаллографическим направлениям, лежащим в плоскости ромбоэдра ($21\bar{3}2$).

Наибольший интерес представляет наличие астеризма на лауэграммах

Ф и г. 30. Пластическая деформация кварца в условиях опыта. Схема астеризма на лауэграмме кварца (рентгеновский пучок направлен вдоль оптической оси. Пояснения в тексте



с ориентированными установками кристалла. Было сделано 12 снимков с вертикальной ориентировкой оси с при совпадении с направлением рентгеновского пучка всех направлений a и $a\sqrt{3}$ (последовательно с поворотом вокруг вертикали на 30°) и один снимок, где ось c совмещалась с направлением рентгеновского пучка.

На серии лауэграмм, снятых перпендикулярно оптической оси, форма пятен, полученных в результате отражений от зоны с осью (0001) , изменялась от снимка к снимку и имела форму либо зигзагов, либо уголков (ориентированных к центру лауэграммы). Такие формы лауэвских пятен свидетельствуют не только о наличии скольжения и пластической деформации, а также о том, что процесс шел не по одной, а по крайней мере по двум (или по нескольким) разным системам поверхностей скольжения. Сравнением всех снимков серии установлено, что максимальный астеризм для рефлексов наблюдается от двух кристаллографических зон — направления $[10\bar{1}0]$ и соседнего с ним $[21\bar{3}0]$.

Астеризм проявляется также на снимке при ориентировке рентгеновского пучка вдоль оси c . Схема формы пятен этой лауэграммы приведена на фиг. 30. Видно, что оси максимального разворота блоков проходят не вокруг направлений $[10\bar{1}0]$ и $[21\bar{3}0]$, а вокруг промежуточных $[3140]$, $[4150]$ и близких к ним направлений.

Полученные данные рентгенографического изучения деформированного образца кварца фиксируют, что в условиях опыта пластическая деформация проявлялась весьма интенсивно. Характер развития астеризма с учетом всех остальных результатов исследования показывает, что развитие пластической деформации кварца в данном случае идет по сериям иррациональных плоскостей скольжения.

Обсуждение результатов. Проведенное изучение пластической деформации кварца в условиях его стабильного и метастабильного существования позволяет достаточно полно представить картину развития этого процесса. Так, в условиях, в первом приближении имитирующих природные, под действием ориентированного усилия до 3,5 кбар в монокристалле исходного бездислокационного кварца наблюдается остаточная деформация решетки.

Пластическая деформация фиксируется макроскопически (сложный характер сколов, характерное развитие двойников), в шлифах под обычным микроскопом (аномальное облачное погасание, двуосность), при просмотре реплик под электронным микроскопом (развитие серий микрополос скольжения — сдвига и дислокационных структур) и при изучении образца методом дифракционной микрорентгенографии (методом Фудживара, — двойникование и развитие субструктуры).

На ранних стадиях пластическая деформация кварца (отдельный монокристалл в условиях опыта — условия ориентированного сжатия) осуществлялась путем двойникования (дофинейские двойники). Поскольку относительно направления действующего усилия упругие константы в двойниковых индивидах ориентированы различным образом, по мере развития деформации менее устойчивый в данных условиях двойник исчезает; последним объясняется практическое отсутствие двойников в тектонитах.

Пластическая деформация монокристалльного кварца в основном развивается по сумме иррациональных плоскостей скольжения. Они ориентированы в пространстве произвольно и, по-видимому, их развитие контролируется анизотропией упругих свойств кварца. Наличие субструктуры особенно важно не только потому, что впервые позволило видеть особенности распределения остаточной деформации в образце монокристалла кварца и не только потому, что дает возможность связать между собой явления пластической деформации, устанавливаемые различными методами исследования, но и потому, что развитие субструктуры однозначно указывало как на дислокационную природу явления, деформационный характер происхождения дислокаций, так и на ведущую роль субструктуры в развитии пластической деформации.

Для более полной характеристики пластической деформации кварца, наблюдаемой в условиях опыта, отметим: сложную и неоднородную картину распределения напряжений в образце деформируемого кварца в условиях опыта; дислокационную природу границ между блоками (по данным электронной микроскопии — развитие сложных дислокационных комплексов), обеспечивающую сохранение сплошности материала при деформации; смещение отдельных блоков субструктуры, а также развитие поверхностей скольжения, сдвига, фиксируемых под электронным микроскопом, что происходит в основном по поверхностям, не имеющим четкой кристаллографической привязки; возможность некоторой одновременности развития отдельных этапов деформации.

Все эти явления практически наблюдались и в опытах, в которых кварц находился в условиях метастабильного существования (в последнем случае указанные признаки выражены более отчетливо). Особенно хотелось бы отметить особенности развития пластической деформации кварца в условиях сверхвысокого давления, выразившиеся в развитии иррациональных поверхностей скольжения в интервале $(10\bar{1}0) - (21\bar{3}0)$. Сопоставление положения указанных поверхностей скольжения с ориентировкой упругих модулей низкотемпературного кварца позволяет говорить о возможной связи развития плоскостей скольжения с упругими константами кварца. Возможно, и в экстремальных условиях в сложно-напряженном образце анизотропия упругих свойств материала контролирует развитие необратимых деформаций.

Вместе с тем в проведенных опытах не уточнено главное — конечная ориентировка блоков возникшей субструктуры относительно направления внешней силы — конечная ориентировка кристаллической решетки кварца в ходе развития его пластической деформации в условиях одноосного сжатия. Из-за отсутствия этих данных нельзя однозначно решить вопрос о физической природе ни пластической деформации упругоанизотропного кристалла, ни поликристалла, сложенного аналогичными индивидами.

*Деформационные структуры
искусственно полученных кварцевых пород*

В данных опытах общая тенденция переориентировки зерен кварца в ходе развития пластической деформации устанавливается статистически на основании изучения структурных преобразований искусственной кварцевой породы. Получение только общей характеристики деформационных структур искусственной кварцевой породы позволило отказаться от дорогостоящего оборудования и идти по пути создания простого прибора, доступного для массового повторения [29], — дальнейшей разработки прессформы Адамса [115], успешно применяющейся при экспериментальных работах и в настоящее время [24 и др.].

Аппаратура и методика исследования.

Прибор представляет собой тонкостенную трубку с закраинами из незакаленной стали У-8 (высота 50 мм, наружный диаметр 20 мм, внутренний 15 мм), закрывающуюся с двух сторон стальными поршнями, которые в отличие от прибора Ф. Адамса [115] снабжены медными уплотняющимися коническими втулками, обеспечивающими деформацию образца в атмосфере паров соответствующих растворов, а также накладным нагревателем, позволяющим вести опыты при нагреве. Работа прибора заключается в том, что ориентированное давление от пресса через поршни передается на образец (в наших условиях — чистый кварцевый песок). Образец может деформироваться при деформации стенок трубки. Сопротивление стенок, остающееся более или менее постоянным при определенных нагрузках и в определенные интервалы времени, отождествляется со всесторонним давлением.

К числу недостатков прессформы Адамса относится то, что прибор не дает гидростатического давления в "чистом" виде, в ходе опыта оно непостоянно. При изучении особенностей формирования деформационных структур изменение давления в ходе опыта может считаться положительным явлением.

Для опытов использовался, как и при изучении седиментационных структур, люберецкий песок (верхняя юра, размеры зерен 0,25—0,15 мм, содержание кремнезема 99,9%, окислов железа в среднем 0,05 %; таблица II, а). Условия проведенных опытов следующие: всестороннее сжатие до 2 кбар, ориентированное давление до 4 кбар, температура до 400°С, вес исходной навески песка до 12 г, продолжительность опытов до 48 час. Необходимое количество насыщенного щелочного раствора (0,03—0,1 г) вводилось в прессформу до начала опыта. Условия эксперимента выбирались с учетом результатов опытов Х.В. Ферберна [97], впервые получившего из кварцевого песка "синтетический кварцит".

В ходе эксперимента отмечалось из-за уменьшения пористости уменьшение первоначального объема навески песка (примерно до 50%). Образцы искусственной породы имели боченкообразную форму, фиксирующую деформацию стенок прессформы. Были проведены две серии опытов продолжительностью до 10 и 48 час. с применением различного типа насыщенных щелочных растворов (NaHCO_3 , Na_2CO_3 и др.). Результаты в пределах каждой серии опытов независимо от типа растворов были практически сопоставимы.

В ходе опытов выявилось, что в зависимости от продолжительности

эксперимента существенно меняется облик получаемой искусственной породы. Продолжительность опыта до 10 час. приводила к формированию породы типа песчаника, а увеличение времени опыта до 48 час. (при тех же условиях) — к образованию искусственной породы типа кварцитовидного песчаника.

Искусственный песчаник (опыты продолжительностью 10 час.). Полученная в результате опыта искусственная кварцевая порода в пределах образца неоднородна: в краевых участках под поршнями (на участках менее деформированных) она приближается к слабосцементированному песчанику, в центральной (наиболее деформированной) части — к более плотному.

Под микроскопом отчетливо видно (таблица X), что полученная порода не содержит пустот, крупных пор, образующихся при простом прессовании песка; пористость всего образца 8%, исходная пористость рыхлого песка 50%. Размеры зерен уменьшились (преобладает размер 0,15 мм). Наблюдается более резко выраженное волнистое угасание, отдельные зерна обладают грубомозаичным (блоковым) угасанием. Отчетлива тенденция к ориентировке зерен по форме в направлении, перпендикулярном направлению действующего усилия (перпендикулярно стенкам прессформы). Большие изменения структурных признаков наблюдаются в зоне деформации. В целом полученная порода по своей структуре напоминает искусственный песчаник, полученный X. Ферберном [97].

Под микроскопом в полученном песчанике отмечаются два типа границ между зернами кварца: а) между зернами наблюдаются пылевидные включения, пузырьки воздуха, скопления окислов железа (мигрировавших из стенок прессформы); б) границы зерен лишены подобных включений (в них нет также каких-либо отчетливо наблюдаемых реакционных зон или оторочек, новообразований и пр.) и не отличаются от аналогичных границ в природных образованиях.

Для уточнения особенностей литификации, происходящей в условиях опыта, в исходную навеску песка добавляли мелкие чешуйки слюды (муковит).

После опыта в данном режиме можно было видеть, что чешуйки слюды смяты, в ряде случаев как бы обернуты вокруг отдельных зерен кварца, иногда как бы вдавлены в кварц; наблюдаемые признаки однозначно указывают на существование механического уплотнения. Криволинейные границы, наличие зерен, "вдавленных" в другие зерна, ореолы напряжений в зернах на участке "вдавливания", деформационные полоски убедительно подчеркивают пластическую деформацию зерен агрегата. Отмечается развитие элементов растворения под давлением, типа рассмотренных ранее в осадочной породе (фиг. 20 и 21). Отчетливое развитие регенерационных структур не наблюдалось.

Уточнение структурных особенностей искусственного песчаника на основе изучения морфологических признаков (изучались зерна с отчетливо выраженным сочленением в тройных точках; фиг. 31 а, а₁, а₂) показало следующее: а) границы зерен в основном криволинейны; б) формы зерен в плоском сечении преимущественно пяти- и четырехугольные; в) кривая распределения двугранных углов хотя и имеет максимум при 120°, равный 12%, но наличие дополнительных максимумов при 180 и 40–80° указывает

на развитие элементов пластической деформации (с кривыми подобного типа мы уже сталкивались при изучении литифицированных песчаных пород, фиг. 17) и при изучении пластической деформации природного кварцитовидного песчаника в условиях опыта (фиг. 27).

Оптическая ориентировка зерен кварца, ее основные особенности аналогичны установленным для осадочных пород. При большом числе замеров узоры диаграмм недостаточно отчетливы, каждый участок характеризуется сходным, но в пространстве различно ориентированным узором. Ориентировка длинных осей зерен в отличие от ориентировки оптической однозначна; длинные оси зерен ориентированы перпендикулярно компоненте осевого сжатия. В зоне деформации ориентировка более отчетлива, чем в зонах под поршнями, т.е. ориентировка зерен по форме улучшается при возрастании интенсивности деформации.

В целом наблюдаемая картина развития ориентировки такая же, как и установленная в природных кварцито-песчаниках: возрастание степени совершенства ориентировки по форме практически не отражается на совершенстве оптической ориентировки; она аналогична ориентировке, наблюдаемой в цилиндрической форме до опыта. Это рассматривалось более детально раньше, при изучении оптической ориентировки рыхлых осадочных пород (фиг. 7).

Искусственный кварцитовидный песчаник (продолжительность опыта 48 час.). Опыты проводились в тех же условиях, что и ранее рассмотренные, но с увеличением продолжительности экспозиции до 48 час. (в рассматриваемых ниже опытах применялись насыщенные растворы KHCO_3 и NaHCO_3 ; результаты опытов микроскопически аналогичны). Извлеченные из прессформы образцы уже на сколе несколько отличаются от полученных ранее в опытах при экспозиции 10 час. Скол образца соответствует представлению о сливной породе, в которой не отмечаются отдельные зерна; полученная порода не царапалась иглой, как в предыдущей серии опытов. По облику искусственная порода в зоне под поршнями близка к плотному песчанику (кварцитовидному), а в зоне деформации — к сливному кварциту. Пористость образца 0,8%.

Под микроскопом в шлифах, характеризующих сечение, параллельное направлению действующего усилия, можно видеть, что основная масса искусственной породы представлена более мелкозернистым, чем исходный песок, материалом (преобладают частицы размером 0,1 мм). В зоне под поршнями искусственная порода приближается к рассмотренному ранее песчанику, полученному в опыте с экспозицией 10 час. (таблица X, а).

В зонах краевых частей конуса деформации (вблизи стенок прессформы) в шлифах под микроскопом упорядоченность ориентировки зерен кварца по удлинению за счет интенсивного развития вытянутых, как бы развальцованных зерен, не характерна для зерен исходного песка. Изменение формы отдельных зерен идет без разрыва (видимого микроскопически и микроскопически) сплошности. Границы удлинённых зерен изогнуты, взаимопроницающи. Сами зерна имеют резко выраженное волнистое угасание, что обусловлено различной ориентировкой оптических осей на локальных участках (таблица X, б).

Аномальное волнистое, полосчатое угасание зерен, изогнутые взаимопроницающие границы удлинённых зерен, появление тонкогранулированно-

го материала на контактах зерен (аналогичное явление наблюдалось при изучении деформационных структур в опытах с кварцем, таблица VI) характеризуют пластическую деформацию агрегата зерна в условиях опыта.

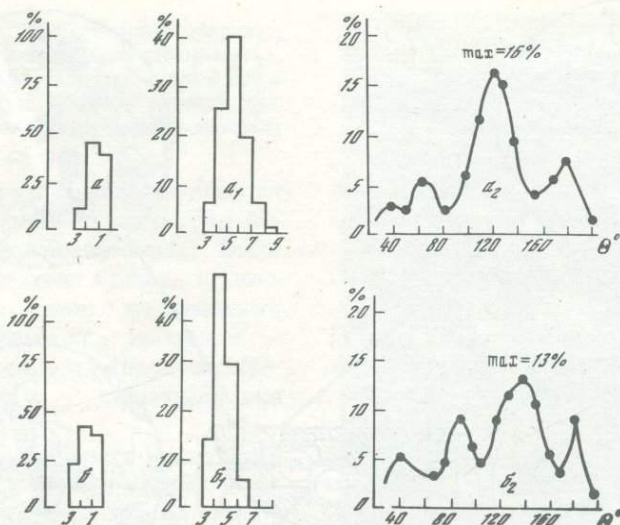
В целом приведенные данные показывают, что с возрастанием степени деформации изменяется соотношение отдельных структурных элементов, отражающих различные процессы формирования структурных признаков рассматриваемой породы. Так, если в зоне под поршнями можно видеть элементы механического уплотнения, внутризеренные микродеформационные структуры (деформационные пластинки), элементы межзеренных структур растворения под давлением, возможную регенерацию и пластическую деформацию, то в наиболее деформированной части образца элементы пластической деформации доминируют.

Уточнение особенностей структуры полученной в опыте искусственной породы на основе изучения морфологических признаков показало следующее (изучалась центральная часть образца; фиг. 31, б, б₁, б₂): границы зерен отчетливо криволинейны; форма зерен в плоских сечениях преимущественно четырех- и пятиугольная; кривая распределения двугранных углов не имеет ничего общего с кривой, характерной для равновесной гранобластовой структуры, не только потому, что максимум при 120° равен всего 13%, но и потому, что на кривой отмечается ряд максимумов (40, 90, 140, 180°); по-видимому, рассматриваемая кривая характеризует переход от гранобластовой структуры к структуре отчетливо деформационной (фиг. 27, а).

Изучение ориентированного строения искусственного кварцитопесчаника проводилось на трех участках, расположение которых показано на схеме шлифа фиг. 32 (шлиф был приготовлен только из заштрихованной части образца). Участок 1 характеризует ориентировку зерен кварца в основании конуса деформации, участок 2 — в средней части образца, участок 3 представляет зону наибольшего проявления деформации. Изучение ориентировки на указанных участках показало следующее [29].

О р и е н т и р о в к а з е р е н п о у д л и н е н и ю. На всех участках длинные оси зерен кварца ориентированы перпендикулярно направлению приложения действующей силы (перпендикулярно компоненте осевого сжатия); наиболее интенсивно ориентировка зерен кварца проявлена на участке 3 (диаграмма 3'), наименее — на участке 1 (диаграмма 1').

О п т и ч е с к а я о р и е н т и р о в к а з е р е н к в а р ц а. Участок 1 (диаграмма 1): узор диаграммы неопределенный; ряд максимумов, разбросанных по полю диаграммы, напоминает ориентировки в рассмотренном ранее опыте и в типичных осадочных породах; участок 2 (диаграмма 2): оптические оси зерен кварца диаграммы имеют достаточно четкую ориентировку в виде поясного узора, в пределах пояса отмечаются два примерно взаимно перпендикулярных максимума с наибольшей плотностью на периферии диаграммы и в ее центральной части; участок 3 (диаграмма 3): узор диаграммы еще проще, так как здесь выходы оптических осей концентрируются в одном сложном максимуме в пределах средней части диаграммы, причем форма сложного максимума показывает, что в его проявлении еще отмечается тенденция к поясному строению, максимум выходов оптических осей на узоре диаграммы ориентирован субперпендикулярно направлению действующего усилия.



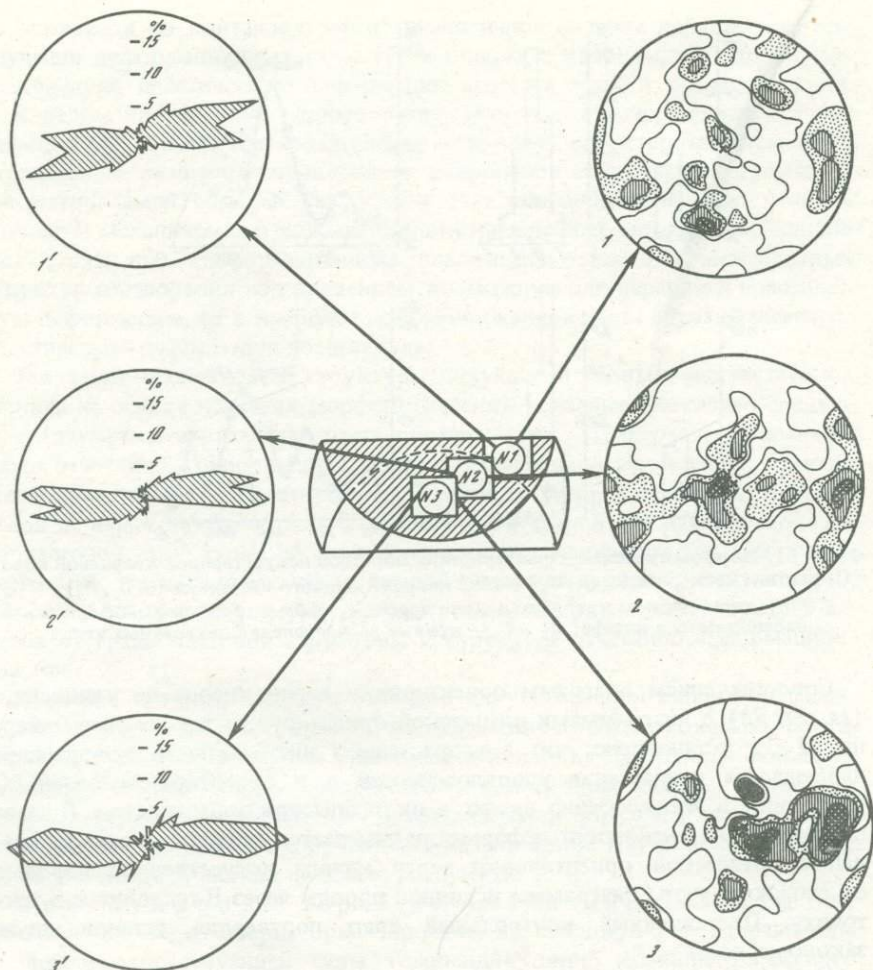
Ф и г. 31. Морфологическая характеристика образцов искусственной кварцевой породы типа песчаника (a, a_1, a_2) и типа кварцитовидного песчаника (b, b_1, b_2)
 a и b — гистограммы кривизны границ зерен; a_1 и b_1 — гистограммы форм зерен, наблюдаемых в шлифе; a_2 и b_2 — кривые распределения двугранных углов

Сопоставлением диаграмм ориентировки зерен кварца по удлинению ($1a, 2a, 3a$) с диаграммами оптической ориентировки тех же зерен кварца ($1-3$) установлено, что с возрастанием интенсивности деформации наблюдается возрастание упорядоченности и в ориентировке зерен по удлинению и, что особенно важно, в их оптической ориентировке. В зависимости от интенсивности деформации намечается следующая схема изменения оптической ориентировки зерен кварца искусственной породы: от сложного узора диаграммы исходной породы через В-тектонит к S-тектониту. Поставленный контрольный опыт подтвердил установленную закономерность.

Изучение искусственных пород под электронным микроскопом. Методом электронной микроскопии изучались особенности становления искусственной породы и особенности ее пластической деформации. Исследование велось методом реплик. Поверхности образцов предварительно не протравливались. Уточнение особенностей литификации искусственного кварцитовидного песчаника показало следующее.

В репликах, полученных со сколов искусственной породы на границах между субзернами, можно видеть новообразование в виде мелких форм, лишенных кристаллографических очертаний, в зоне деформации эти новообразования выражены интенсивнее — их больше и площадь каждого из них значительнее. По-видимому, указанные новообразования могут указывать на возможность перераспределения SiO_2 в ходе становления искусственной породы.

Пример, приведенной на фиг. 33, показывает, что в зоне интенсивной деформации в зернах кварца искусственной породы может развиваться субпараллельная система микроповерхностей скольжения, по которым



Ф и г. 32. Микроструктурный анализ части шлифа (заштрихована) искусственного кварцитовидного песчаника. Шлиф ориентирован по наибольшему диаметру в плоскости параллельной направлению действующего усилия

1'—3' — диаграммы ориентировки зерен кварца по удлинению, 1—3 — диаграммы оптической ориентировки тех же зерен (изолинии: 1—2—3—4—5 > %; max = 6%). Положение замеренных участков приведено на схеме в центре фигуры. Каждая диаграмма построена на основании 100 замеров

смещались отдельные элементарные слои (размерами в полмикрона и меньше). В целом картина развития деформации близка к явлениям, рассмотренным ранее, при пластической деформации кварца в условиях опыта (таблица VIII).

Проверка соответствия условий опыта природным условиям (моделирование биметасоматического процесса). При получении искусственной породы в опытах были созданы условия, приближающиеся к природным, но пока нет уверенности в подобии условий эксперимента природным усло-

Ф и г. 33. Искусственный кварцито-видный песчаник (зона деформации). Развитие поверхностей скольжения в зерне кварца. Угольная реплика. Масштаб соответствует одному микрону

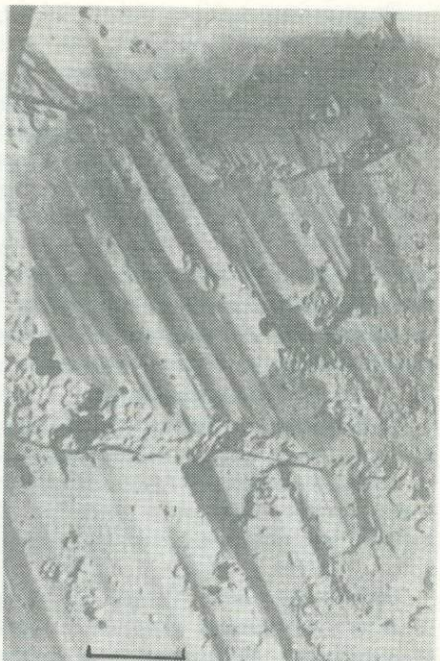
виям (в которых развиваются деформационные структуры метаморфизованных пород). Было решено провести опыты по воссозданию одного из основных метасоматических процессов — биметасоматоза (процесса диффузионного взаимодействия пород).

В качестве исходных материалов были взяты кварц, доломит и кальцит. Такой выбор продиктован тем, что ассоциации указанных минералов присутствовали в природных пластически деформированных кварцдиопсидовых породах Юго-Западного Прибайкалья (о чем упоминалось ранее; таблица III) и именно взаимодействием кварца и доломита было обусловлено развитие биметасоматических оторочек на линзах мрамора.

Методически постановка опыта осуществлялась следующим образом. В прессформу помещали 10–12 г люберецкого песка с добавкой нескольких зерен соответствующих карбонатов (размерами меньше 1 мм) и нескольких капель раствора (до 0,1 г) соответствующего состава (H_2O , $CaCl$, $KHCO_3$ или Na_2CO_3). Далее режим опыта соответствовал принятому, но температура была ниже ($250-300^\circ$) и экспозиция меньше (в среднем 2,5 часа).

Наиболее благоприятные результаты (в опытах без растворов и с дистиллированной водой новообразования не отмечались) были получены с насыщенным раствором Na_2CO_3 (0,1 г). На границе зерен доломита и кварца образовывалась реакционная оторочка мощностью до десятков долей миллиметра (таблица XI). Для нее не всегда характерны ровные, прямые границы, часто они были зазубрены, изъедены. Оторочка представляла собой агрегат мелких (тысячные доли миллиметра) чешуйчатых минералов с высокой интерференционной окраской (их ориентировка в пределах оторочки могла быть и беспорядочной, и упорядоченной).

В шлифах после окрашивания ализарином отчетливо видно, что новообразованная оторочка вокруг зерна доломита сложена двумя минералами — кальцитом и мелкочешуйчатым минералом. Последний характеризуется прямым угасанием и высоким двупреломлением ($N_g - N_p = 0,030$). Измерение светопреломления чешуйчатого минерала затруднено исключительной мелкостью его частиц: Оно было проведено на субпараллельно-волоконистом их агрегате, дающем серую интерференционную окраску (сечение, близкое к N_m). Получена величина $N_{cp} = 1,563 \pm 0,005$.



Оптические данные в сочетании с морфологией чешуек и химизмом реагирующих компонентов, как нам представляется, позволяют говорить о тальковой природе чешуек.

Подводя итог проведенным опытам, отметим, что в ходе опыта при температуре до 250–300°С на границе двух упругодеформированных сред возникает реакционная оторочка вследствие взаимодействия кварца с доломитом. Ее можно считать биметасоматической оторочкой, образовавшейся при диффузии компонентов через неподвижный поровый раствор (в условиях опыта его, по-видимому, можно считать неподвижным) в сторону падения концентраций. При этом происходит преимущественное замещение более деформированного минерала новообразованием, устойчивым при данных условиях (щелочная среда стимулирует развитие процесса, способствуя более интенсивному переходу в раствор компонентов контактирующих минералов).

В заключение отметим соответствие биметасоматического процесса, наблюдаемого в опыте, природному биметасоматическому процессу.

Обсуждение результатов. В проведенных опытах под действием ориентированного давления в области устойчивости низкотемпературного кварца из навески песка были получены два типа искусственных пород.

При экспозиции 10 час. искусственная порода аналогична осадочной породе — песчанику. Результаты (микроскопические и электронномикроскопические) подтвердили сделанные ранее, на природных объектах, выводы о том, что в основе литификации лежит совокупность механического уплотнения, пластической деформации и перераспределения SiO_2 (структуры растворения под давлением и регенерации), что и обуславливает превращение рыхлого кварцевого песка в плотную породу — песчаник (при ведущей роли процесса пластической деформации).

При увеличении экспозиции до 48 час. в ходе опыта образуется искусственный кварцитопесчаник, обладающий отчетливо выраженной деформационной структурой. Причину развития деформационных структур в рассматриваемом случае необходимо связывать с тем, что прессформа Адамса не дает чистой гидростатики и может деформироваться в ходе опыта в направлении, перпендикулярном приложенному усилию. Развитие деформационной структуры искусственной породы обусловлено пластической деформацией слагающих его индивидов.

Пластическая деформация отдельного зерна в данном случае аналогична наблюдаемой в ранее рассмотренных опытах с монокристаллами кварца, включая и несколько разновременный характер развития пластической деформации на локальных участках. В ходе развития пластической деформации искусственной породы на стадии образования песчаника оптическая ориентировка слагающих породу зерен кварца во многом аналогична наблюдаемой в рыхлых песках, включая и ориентировку зерен по форме. В рассматриваемом случае зерна кварца ориентируются длинными осями перпендикулярно направлению действующего усилия.

На стадии образования искусственного кварцитовидного песчаника отмечается принципиально новое: помимо однозначной ориентировки зерен по удлинению отчетливо устанавливается однонаправленное изменение и пространственной ориентировки кристаллических структур пласти-

чески деформируемых зерен кварца искусственной породы относительно направления действующего усилия.

Судя по узорам диаграмм оптической ориентировки, переориентировка зерен при развитии деформационной структуры в условиях ориентированного сжатия идет в следующем направлении: от сложного узора диаграмм исходной породы, через узор В-тектонита к более простому узору, типа S-тектонита (в зоне интенсивной деформации). Максимумы, образующие узор S-тектонита, располагаются субперпендикулярно направлению компоненты осевого сжатия под углами $60-80^\circ$.

В свете полученных данных можно принять, что лежащая в основе пластической деформации кварцита переориентировка блоков субструктуры отдельного зерна кварца также имеет однонаправленный характер.

Приведенные данные указывают на ведущую роль кристаллической структуры индивида в развитии пластической деформации агрегата.

Наблюдаемое увеличение степени совершенства оптической ориентировки зерен кварца в ходе развития пластической деформации кварцита позволяет, с учетом результатов изучения литификации осадочных пород и внутризеренных микродеформационных структур, ставить вопрос о ведущей роли упругих свойств индивида в пластической деформации породы.

Сходство условий опыта с природными (судя по характеру биметасоматической оторочки на контакте кварца и доломита) допускает перенос результатов изучения искусственных деформационных структур на аналогичные природные объекты в определенных пределах; ограничение в основном обусловлено сложностью распределения действующего усилия в образцах в условиях опытов.

Деформационные структуры природных объектов

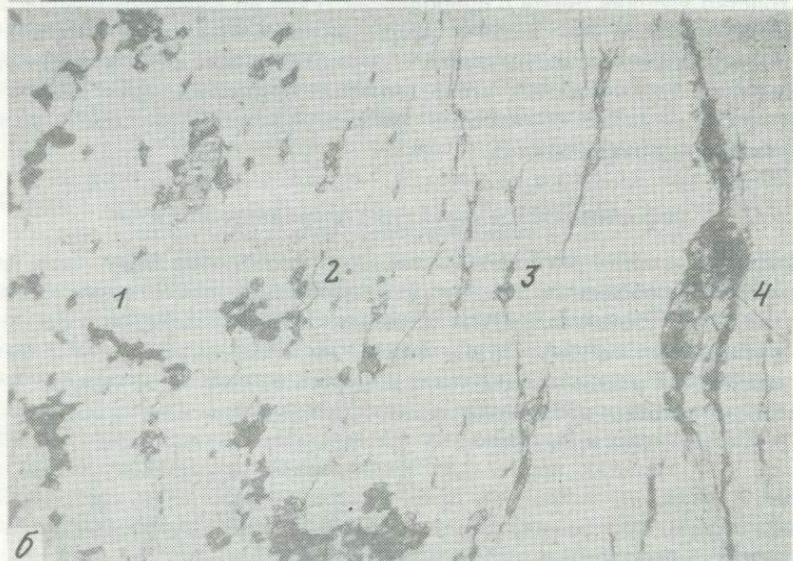
Изложенные выше результаты, позволяющие составить лишь общее представление об особенностях и причинах развития деформационных структур, проверялись и уточнялись путем изучения природных метаморфогенных деформационных структур существенно кварцевых пород. Ниже в основном излагаются результаты изучения деформационных структур, наблюдаемых в кварцитовых пропластках рассмотренных ранее кварц-диопсидовых пород Юго-Западного Прибайкалья (таблица III). Вначале приводятся данные об особенностях проявления пластической деформации кварцита в одном сечении, затем этот же процесс рассматривается на трех взаимно перпендикулярных сечениях, что позволяет характеризовать развитие пластической деформации в объеме породы.

Структурные особенности пластически деформированного кварцита (в одном сечении)

В изучаемом образце кварц-диопсидовых пород Юго-Западного Прибайкалья имела зона "интенсивного течения" кварцитового материала мощностью примерно 15 мм. Она выделялась среди обычного светло-серого кварцита (характеризующегося отчетливо видимой равномерной зернистостью) более темной окраской, отсутствием зернистого строения, однозначной ориентировкой отдельных встречающихся здесь удлинённых белых



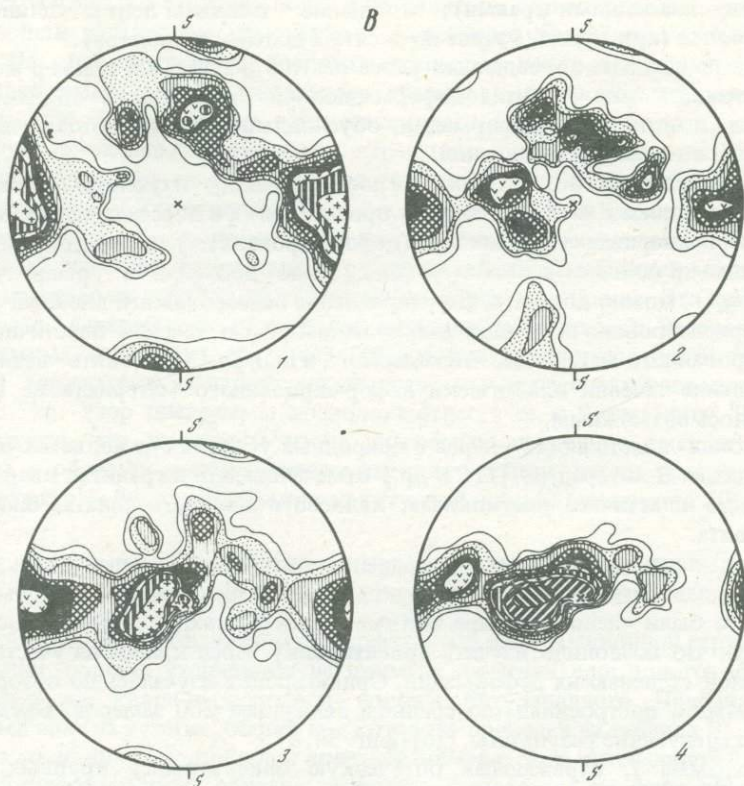
a



b

Ф и г. 34. Пример изменения оптической ориентировки зерен кварца при природной пластической деформации кварцита (кварцитовый пропласток кварц-диопсидовой породы Юго-Западного Прибайкалья)

a — характер перехода от кварцита малодеформированного к интенсивно деформированному (в правой части шлифа); увел. 10, с анализатором; *b* — при одном никеле отчетливо виден характер деформации зерен диопсида в ходе развития пластической деформации вмещающего их кварца; 1-4 — зоны замеров, на основе которых построены микроструктурные диаграммы *b*; *S* — направление зоны течения кварцевого материала в образце



Ф и г. 34 (окончание)

зерен магнезиального диопсида. Для исследования был взят срез, перпендикулярный установленному макроскопически направлению течения кварцевого материала.

Изучение вмещающего зону "интенсивного течения" кварцита в шлифах под микроскопом показало, что он сложен крупными (до 5 мм) зернами кварца; структура агрегата гранобластовая. Практически все зерна структуры несут элементы тектонического воздействия (аномальное угасание зерен, ореолы напряжений вокруг включений, мозаичность, изогнутые, взаимопроникающие границы, появление в отдельных зернах деформационных полосок).

В шлифе переход от малодеформированного (макроскопически недеформированного) кварцита к кварциту зоны интенсивного течения происходит так (фиг. 34, а и б). Отдельные зерна кварца в кварците, обладающем мостовой гранобластовой структурой, с переходом к зоне начала пластической деформации приобретают иную — лапчатую — форму. Границы таких зерен зазубрены, взаимопроникающи, для них характерно более четко выраженное аномальное погасание. С переходом к зоне "интенсивного течения" зерна кварца удлинятся (аномальное угасание сохраняется). В зоне интенсивного течения кварцевый материал представлен серией вытянутых в одном направлении кварцевых лент (с частично изогнутыми,

взаимопроникающими краями); отношение толщины лент к удлинению 1:10 и более (при толщине зерна до десятых долей миллиметра).

Судя по данным проведенных ранее опытов, изучаемый пример можно рассматривать как развитие деформационной структуры в одноактном процессе пластической деформации, обусловленном воздействием на породу ориентированного давления.

Основываясь на результатах макроскопического изучения обнажения и образца, а также на закономерной ориентировке в пластически деформированном кварците удлинённых (деформированных) зерен диопсида и явлениях будинажа в них (длинное зерно диопсида в правой части фиг. 34, б), можно полагать, что направление действовавшей внешней силы было ориентировано перпендикулярно направлению течения пластично деформированного материала, наблюдаемого в шлифе. Установить истинное направление течения пластически деформированного материала не представлялось возможным.

Высокая пластичность кварца в природных условиях не является чем-то необычным. В литературе [116 и др.] отмечалось, что в гранитах кварц может быть пластичнее плагиоклаза, калиевого полевого шпата, биотита, мусковита.

Для выяснения особенностей изменения оптической ориентировки зерен кварца в зависимости от интенсивности развития пластической деформации кварцита были сделаны четыре частично перекрывающие друг друга серии замеров, что позволило изучить ориентировку зерен кварца на участках с различной степенью их деформации. Ориентировка изучалась по обзорным диаграммам, построенным по средним величинам 200 замеров. Были получены следующие результаты [26] (фиг. 34, в).

Диаграмма 1, отражающая оптическую ориентировку крупных изометричных зерен кварца (часть которых несет следы слабой пластической деформации), показывает, что зерна кварца кварцита данной зоны имеют достаточно ясно выраженную ориентировку. На диаграмме наблюдается система двух максимумов. Один максимум расположен на периферии диаграммы в направлении горизонтального диаметра; его плотность достигает 6%. Другой сложный максимум развит около вертикального диаметра; его плотность равна 4%. Он имеет сложное строение, поскольку образован тремя максимумами, в расположении которых наблюдается тенденция к образованию поясного узора. По своему характеру четкий узор диаграмм напоминает обычную для тектонитов "фигуру давления", "сплющивания".

Диаграмма 2, составленная на основании замеров оптических осей кварца в зоне начала пластической деформации, имеет узор, напоминающий узор R-тектонита. Максимум, приуроченный к вертикальному диаметру, имеет меньшую плотность (до 2%). Отмечается появление новой группы максимумов в центральной части диаграммы. Эти максимумы (плотностью до 4%) имеют различные формы, и в их расположении намечается тенденция к поясному расположению вдоль горизонтальной оси (параллельно направлению действовавшей силы).

Узор диаграммы 3, отражающий ориентировку кварца из зоны развития деформации, имеет более четко выраженное поясное строение, как у типичного В-тектонита. На диаграмме видно, что максимум около вертикального

диаметра исчез, а в строении пояса в направлении горизонтального диаметра произошли дальнейшие изменения — пояс узора диаграммы стал сплошным. На фоне этого пояса помимо максимума, приуроченного к периферии диаграммы (у горизонтального диаметра), в центральной его части начинает обособляться еще один максимум (с плотностью до 6%). Судя по двум указанным максимумам, перед нами опять проявление "фигуры сплющивания", но ее ориентировка отличается на 90° от рассмотренной на диаграмме I. Характерно, что пояса диаграмм и R- и B-тектонита ориентированы параллельно направлению внешнего действующего усилия.

В зоне наиболее интенсивного развития пластической деформации (4) узор диаграммы оптической ориентации кварца еще проще. Это происходит из-за дальнейшего увеличения площади и плотности центрального максимума (плотность достигает 10%) и уменьшения плотности (и площади) максимума на периферии диаграммы у горизонтального диаметра (до 3,5%). Узор диаграммы позволяет отнести ее к S-тектониту. Весьма характерно, что максимум узора диаграммы несколько смещен от ее центра и образует с направлением внешнего действующего усилия (судя по структурам будинажа с микроструктурной осью c) угол около 70° .

Структурные особенности деформированного кварцита (в объеме породы)

Особенности становления метаморфогенной деформационной структуры в объеме породы уточняются на примере изучения еще одного образца кварцита из кварц-диопсидовой породы Юго-Западного Прибайкалья. Образец взят на участке, общий вид которого приведен на таблице III, б.

Макро- и микроскопическое описание образца. Зона интенсивной пластической деформации в образце отчетливо выделяется на фоне обычного серого кварцита более темным цветом, отсутствием обычной для кварцита зернистости, резкой удлинненностью белых зерен диопсида (и кальцита), встречающихся среди вытянутых в одном направлении зерен кварца. В этом образце (размером $10 \times 10 \times 3$ см) визуальное, по текстурным признакам, можно выделить: а) зону кварцита, в котором макроскопически деформация не отмечается; б) зону слабо деформированного кварцита; в) зону, переходную к интенсивно деформированному материалу, и г) зону интенсивной пластической деформации — интенсивного течения (ее мощность до 5 мм). Постепенная смена указанных зон наблюдается на расстоянии ~ 20 мм (таблица XII, XIII).

Микроскопическое изучение пластической деформации кварцита проводилось на трех взаимно перпендикулярных сечениях. Положение изученных сечений в образце и места взятия шлифов см. на табл. XII, б (образец ориентирован относительно стран света и места взятия). Пластическая деформация кварцита на вертикальном (субширотном) сечении фиг. б (шлиф 477) проходит без разрыва сплошности породы и выражается в изменении размеров и формы исходных зерен, поскольку в зоне интенсивной пластической деформации зерна кварца имеют вид лент шириной до сотых и длиной до десятых долей миллиметра.

При более детальном рассмотрении процесс сводится к следующему. Зерна кварца кварцита, обладающего гранобластовой структурой (размер

зерен (~6 мм), имеют четко выраженное волнистое, полосчатое угасание; практически границы всех зерен искривлены. Среди этих зерен (с приближением к зоне наблюдаемой деформации) появляются отдельные удлинённые лапчатые зерна с резкими зазубренными, взаимопроникающими краями. Отмечено присутствие единичных деформационных пластинок и мелкозернистого кварца на стыках зерен. Иногда в удлинённых зернах удавалось наблюдать появление локальных вытянутых зон; оставшиеся части зерен сохраняли исходное изометричное или "лапчатое" очертание. Оптическая ориентировка исходных зерен и появляющихся вытянутых зон (типа показанных в таблице XIV, а) обычно различна.

Ближе к зоне интенсивного течения становится больше вытянутых зерен кварца. Характер их вытянутости в общем одинаков по направлению, но различен по интенсивности. Волнистое, полосчатое угасание, отмечаемое в лапчатых зернах, выражено более резко в удлинённых. С увеличением степени деформации между удлинёнными зёрнами кварца отмечается появление зон с более резко деформированными зёрнами, причем и те и другие сгибают "жесткие" в данных условиях зерна кальцита и диопсида. Они подвергаются будинированию, что отчетливо видно на фиг. б.

На снимке ясно прослеживается и характер дальнейшего развития процесса — появление в деформированных зернах серий субпараллельных малоэнергичных зон скольжения (ориентированных в данном сечении в направлении течения кварцевого материала). Их развитие приводит к расщеплению удлинённых зерен кварца на ряд тонких кварцевых "лент". Однородность деформации нарушается лишь на участках, где появляются "препятствия", затрудняющие ее развитие (ε), в виде зерен кварца, имеющих иную ориентировку элементов деформации и иную пространственную ориентировку.

В удлинённых зернах кварца иногда наблюдается развитие субпараллельных серий тонких осветленных полос типа линий Людерса, наклоненных к длинной оси зерна под углом около 45°.

В зоне интенсивной деформации ленты кварца становятся еще тоньше, удлинение их достигает 1:80—1:50 (при толщине зерен до сотых долей миллиметра). Границы кварцевых лент в зоне интенсивной пластической деформации (ε) относительно направления течения материала располагаются под углом ~15°. Примечательно, что в данной зоне линейная величина длинных осей кварцевых лент практически не превышает размеров исходных зерен кварца. Несколько вытянутые зерна кальцита и диопсида, имеющие в зоне начала деформации размеры 0,1—1 мм (б), после будинирования в зоне интенсивного течения (ε) уменьшаются до 0,1—0,02 мм и приобретают линзовидную форму. Они однозначно ориентированы (по удлинению) в направлении вытянутости кварцевых "лент" в данном сечении.

В деформированных зернах кварца отмечается слабая двуосность $2v = (+)1-3^\circ$ (замерено по методике В.П. Петрова [6]; изменения величины $2v$ от интенсивности деформации не установлены).

В субгоризонтальном сечении образца (шлиф 615) картина развития пластической деформации в принципе аналогична рассмотренной, но в зоне интенсивного проявления деформации образование кварцевых "лент" не отмечается. В этой зоне зерна кварца приобретают эллипсовидный об-

лик; они удлинены не более чем в 2—7 раз при одновременном уменьшении по наибольшему сечению до 0,02 мм и менее.

Интенсивная деформация и весьма совершенная оптическая ориентировка приводят к тому, что отдельные деформированные зерна в агрегате трудно различимы. Деформированную структуру этого типа можно назвать волокнистой. Границы зерен нечеткие, как бы растушеванные. Однако обтекание кварцевым материалом зерен диопсида и кальцита в данной зоне выражено более отчетливо: в направлении течения кварцевого материала четко наблюдаются "хвосты" дробленного материала включений указанных минералов. На вертикальном, субмеридиональном сечении образца (шлиф 617) по мере увеличения деформации появляются отдельные вытянутые маломощные "ленты" кварца длиной до 6 мм при ширине 0,4—0,2 мм и менее. Внутри "лент" отмечается развитие серии маломощных зон скольжения (смещение по ним, судя по петрографическим признакам, происходило не столько в направлении простирания "лент", сколько в направлении, перпендикулярном к их длинным осям).

Из петрографического изучения деформации в объеме породы можно сделать следующие выводы.

По аналогии с результатами опытов по получению искусственных кварцевых тектонитов (таблицы VI и X), постепенность перехода исходного кварцита в слабдеформированный, а затем — в кварцит зоны интенсивного течения дает основание рассматривать изученную деформацию кварцита как пластическую и считать ее одноактной. Судя по результатам изучения структурных особенностей пластически деформированного кварцита, в основе явления лежит пластическая деформация слагающих породу зерен кварца. Деформация зерен обусловлена закономерным развитием плоскостей скольжения, причем по мере развития пластической деформации плоскости скольжения стремятся расположиться перпендикулярно оси сжатия.

В зоне интенсивной пластической деформации течение кварцевого материала происходит преимущественно в направлении, субперпендикулярном длинным осям зерен. Неравнозначное и неравномерное вначале проявление пластической деформации в отдельных зернах породы с развитием процесса становится упорядоченным. При интенсивном проявлении процесса наблюдается одновременное формоизменение всех зерен агрегата: закономерное смещение зерен, их участков относительно друг друга обуславливает появление деформационной полосчато-волокнистой структуры с неоднозначной оптической ориентировкой слагающих ее индивидов. Макроскопически данная зона определяется как зона интенсивной пластической деформации кварцита (шлиф 615).

На основе полученных экспериментальных данных в принятых в отечественной литературе представлений [66] в изученном образце были установлены соответствующие микроструктурные оси: ось *a* характеризует направление преимущественного перемещения пластически деформируемого материала, ось *c* перпендикулярна плоскости скольжения (в зоне интенсивной пластической деформации), ось *b* перпендикулярна оси *a* и располагается в одной плоскости с ней.

Основываясь на проявлении в данном образце процесса будинажа включений (диопсида и кальцита) в кварците, на форме и ориентировке зерен

кварца, диопсида и кальцита на различных участках всех трех взаимно перпендикулярных сечений образца, принимаем, что в данном случае действующее усилие, вызывающее пластическую деформацию, было ориентировано в направлении, перпендикулярном общему направлению течения кварцита (в направлении микроструктурной оси c). Этот вывод не противоречит результатам изучения макроструктур будинажа, наблюдаемых на обнажении (таблица III, б).

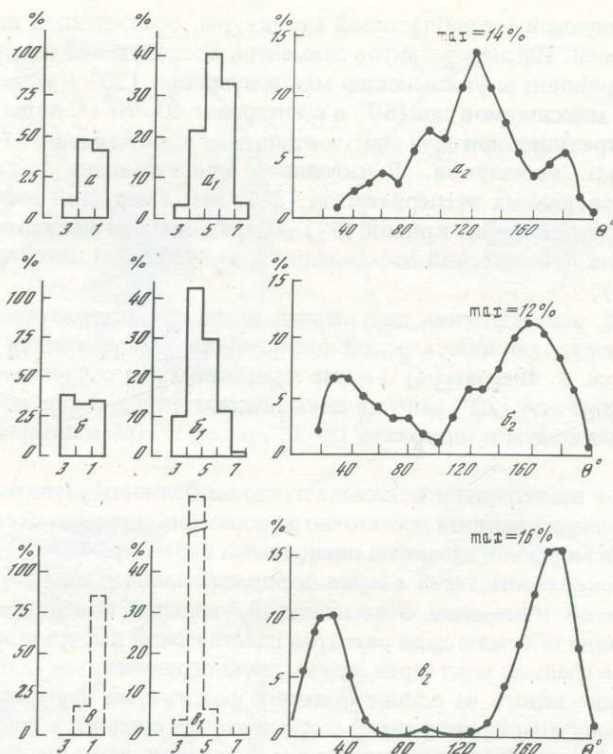
Результаты электронно-микроскопического изучения. Особенности механизма пластической деформации природного кварца изучались методом электронной микроскопии — методом реплик; поверхности сколов образцов предварительно не протравливались. Исследование ряда реплик, полученных с участков кварцита, несущих слабые следы деформации, с более деформированных участков и из зоны "интенсивного течения", показало, что признаки деформации отмечаются в кварците всех указанных участков (таблица XV).

Изучением ряда реплик из зоны интенсивного течения установлено, что в результате развития поверхностей (обладающих обычно синусоидальным искривлением) наблюдается весьма своеобразное расчленение зерна на ряд субпараллельных микрослоев (мощностью от 0,1 до 1 μ). В таблице XV, б отчетливо видна серия субпараллельных микроповерхностей (направление $I-I$), начиная от едва заметных (в левой нижней части фотографии) до достаточно четких. Совокупность развития рассматриваемых поверхностей приводит к появлению весьма характерного ступенчатого скола со следами возможного смещения отдельных слоев относительно друг друга по поверхности скольжения. Подобная картина была встречена ранее, при распространении особенностей деформации искусственного кварцевого тектонита (фиг. 33) и монокристалльного кварца в условиях опыта (таблица VIII).

Отмечаемая в таблице XIV, б субмеридиональная система параллельных трещин различной интенсивности (направление $II-II$) может указывать еще на одну из возможных систем поверхностей смещения. Во всяком случае представление о том, что рассмотренная выше система субпараллельных поверхностей смещения для кварца — не единственная, подтверждается наличием намечающегося ряда субпараллельных поверхностей (направление $III-III$ в верхней части таблицы XV), ориентированных под углом к основной системе (направление $I-I$).

Учитывая: а) общую геологическую обстановку рассматриваемого образца, б) четкое макро- и микроскопическое проявление в нем пластической деформации, в) отсутствие подобных поверхностей смещения на снимках реплик, полученных нами со сколом различных сечений монокристаллов кварца, и г) наличие аналогичных фрагментов в образцах после опытов по получению пластической деформации в монокристалле кварца и искусственного кварцита, можно утверждать, что в данном случае рассматривались элементы пластической деформации кварца. Хрупкая деформация, наблюдаемая в виде различных трещин, ведущих к образованию микрозерен, судя по данным исследования, более поздняя.

Результаты изучения морфологических признаков. Изучение проводилось на трех участках в зонах: а — начала пластической деформации, б — умеренной пластической деформации, в — интенсивной пластической дефор-



Ф и г. 35. Природная пластическая деформация кварцита. Характеристика деформационных структур на основе изучения морфологических признаков

Зоны: а — начала пластической деформации, б — умеренной пластической деформации, в — интенсивной пластической деформации; а-в — гистограммы кривизны границ зерен; a_1 - b_1 — гистограммы форм зерен, наблюдаемых в шлифе; a_2 - b_2 — кривые распределения двугранных углов

магии. Приведенные на фиг. 35 результаты изучения показывают, что развитие пластической деформации однозначно отражается в морфологических признаках структуры. Так, полученные гистограммы кривизны границ зерен (а-в) показывают, что начало пластической деформации приводит к искривлению границ зерен (а), в зоне умеренной деформации количество искривленных границ максимально (б), а в зоне интенсивного развития границы зерен практически прямолинейны (все зерна вытянуты в одном направлении).

Форма зерен претерпевает следующие изменения (a_1 , b_1 , v_1). В зоне начала деформации форма зерен в общем случае характерна для гранобластовой структуры (преимущественно пяти- и шестиугольные формы, б). В зоне умеренной пластической деформации (b_1) начинают преобладать зерна четырехугольной формы. В зоне интенсивной пластической деформации (v_1) в основном развиты четырехугольные формы (ромбовидные; уплощенные, лентовидные и др.).

Кривая распределения двугранных углов изменяется следующим образом (a_2 , b_2 , v_2). В зоне начала деформации (a_2) кривая имеет вид, обыч-

ный для равновесной гранобластовой структуры, осложненной пластической деформацией. Именно развитие элементов последующей пластической деформации приводит к уменьшению максимума при 120° и развитию дополнительных максимумов при 180° и в интервале $40-90^\circ$. С подобным явлением мы встречались при изучении шокшинских и толкачевских (фиг. 17) кварцитовидных песчаников. Высказанное представление подтвердило результаты проведенных экспериментов (фиг. 31). Умеренная деформация характеризуется двугорбой кривой (σ_2) — переходной от аналогичной кривой зоны начала пластической деформации к кривой зоны интенсивной деформации (σ_3).

Для кривой распределения двугранных углов, характеризующей кварцит зоны интенсивной пластической деформации (такая кривая впервые рассматривается в литературе) весьма примечательно следующее: отсутствие максимума при 120° , наличие двух максимумов в интервалах $15-35^\circ$ и $150-190^\circ$, максимум в интервале $15-35^\circ$ равен $\sim 10\%$, в интервале $150-190^\circ \sim 17\%$.

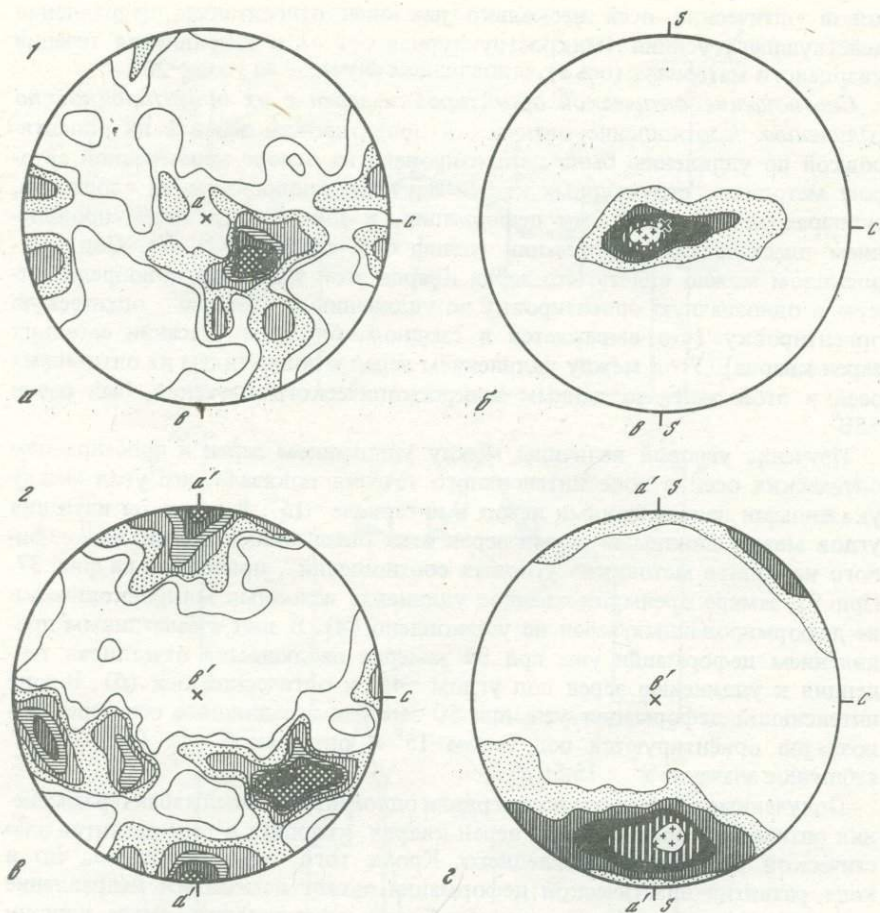
Проведенное исследование показывает, что особенности развития пластической деформации кварцита достаточно хорошо фиксируются всеми тремя примененными морфологическими оценочными параметрами.

Удельная поверхность зерен кварца деформированного кварцита. Общее представление об изменении относительной удельной поверхности зерен кварца в единице объема в ходе развития пластической деформации составлено на основе средних хорд зерен, что вызвано ограниченным количеством их (определение велось на основе больших фотографий изучаемых участков). Были получены следующие средние значения средних хорд (\bar{h}): для зерен исходной гранобластовой структуры 2 мм, для зерен кварца умеренно деформированных 0,5 мм, для зерен кварца зоны с отчетливо проявленной пластической деформацией 0,02 мм. Для зерен кварца зоны интенсивной пластичности замеры не проводились (достоверность замеров весьма относительна, так как границы зерен недостаточно отчетливы).

Вычисленная относительная удельная поверхность (см. "Методика исследования") равнялась (S_a): для исходного кварцита $2 \text{ мм}^2/\text{мм}^3$, для кварцита с отчетливой пластической деформацией $200 \text{ мм}^2/\text{мм}^3$. Эти данные показывают, что в ходе развития пластической деформации относительная удельная поверхность зерен увеличивается в единице объема более чем на 100%.

Оптическая ориентировка зерен кварца. Изучение проводилось в шлифах, характеризующих два взаимно перпендикулярных сечения изучаемого образца (шлифы 477 и 615, таблица XII, Б) на основании диаграмм, построенных по 100 замерам (т.е. изучение проводилось по обзорным диаграммам). Полученные данные показывают, что в зоне начала пластической деформации оптическая ориентировка имеет вид В-тектонита, а зона с отчетливым проявлением деформации и зона интенсивной пластичности характеризуются весьма совершенной оптической ориентировкой типа S-тектонита, причем для зоны интенсивной пластичности оптическая ориентировка более совершенна — плотность максимумов достигает 24–26% (физ. 36, б и г).

Сопоставимость результатов микроструктурного изучения на двух взаимно перпендикулярных сечениях указывает на весьма однонаправ-



Фиг. 36. Природная пластическая деформация кварцита

Оптическая ориентировка зерен кварца в кварците из зон пластической деформации: *a* и *б* — начальной, *б* и *г* — интенсивной (100 замеров). Сечения: 1 — вертикальное (субширотное), 2 — субгоризонтальное. Микроструктурные оси: *a-c* — с однозначно установленным положением; *a'-c'* — с положением, несколько отличающимся от истинного (вследствие неперпендикулярности среза); *S* — направление полосчатости в зоне интенсивной пластической деформации (в образце)

ленный характер переориентировки зерен кварца в объеме породы по мере развития пластической деформации. Упорядочение кристаллических решеток зерен, судя по данным оптической ориентировки, идет таким образом, что в зоне начала развития деформации все оптические оси закономерно располагаются в плоскости деформации, образуя на узорах диаграмм оптической ориентировки поясной узор типа В-тектонита.

По мере развития деформации, происходит дальнейшее упорядочение кристаллических решеток, заключающееся, согласно диаграммам оптической ориентировки зерен, в том, что в пределах пояса В-тектонита намечается направление, в котором ориентируются практически все зерна кварца (S-тектонит в зоне интенсивной пластичности). Максимум вы-

ходов оптических осей несколько наклонен относительно направления действующего усилия (микроструктурная ось c) и направления течения кварцевого материала (ось a), в последнем случае — на угол $\sim 20^\circ$.

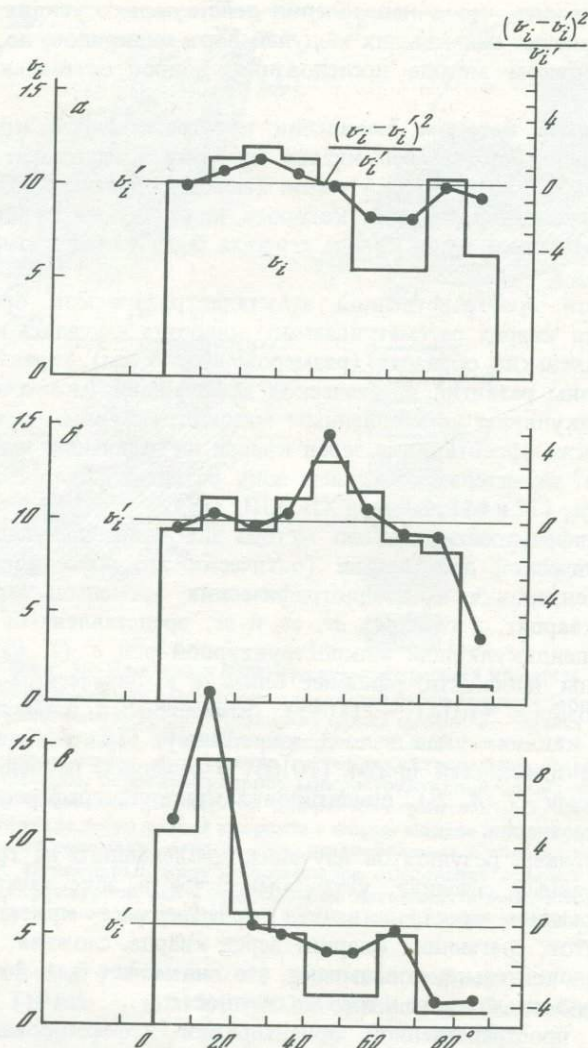
Соотношение оптической ориентировки зерен с их ориентировкой по удлинению. Соотношение оптической ориентировки зерен с их ориентировкой по удлинению было детализировано на основе примененной автором методики "структурных карт". Изучение проводилось на плоскости, субпараллельной плоскости деформации, в зоне с отчетливым проявлением пластической деформации (шлиф 615, таблица XII, Б). Под микроскопом можно видеть, что зерна кварца этой зоны уже приобрели четкую и однозначную ориентировку по удлинению и четкую оптическую ориентировку (что выражается в сходном, близком угасании соседних зерен кварца). Угол между удлинением зерен и положением их оптических осей в этой зоне, по данным микроскопического изучения, был равен $\sim 50^\circ$.

Изучение угловой величины между удлинением зерен и простиранием оптических осей в зоне интенсивного течения показало, что угол между указанными направлениями лежит в интервале $\sim 15^\circ$. Результаты изучения углов между длинными осями зерен и их оптическими осями, выполненного на основе методики "угловых соотношений", приведены на фиг. 37. При 91 замере преимущественное удлинение исходных микроскопически не деформированных зерен не установлено (a). В зоне с отчетливым проявлением деформации уже при 89 замерах наблюдается отчетливая тенденция к удлинению зерен под углом $\sim 45^\circ$ к оптической оси (b). В зоне интенсивной деформации уже при 50 замерах все длинные оси зерен однозначно ориентируются под углом 15° к оптической оси ($\chi^2 = 28,43$, табличное значение $\chi^2 = 15,5$; ϵ).

Полученные результаты подтвердили однонаправленный характер изменения оптической ориентировки зерен кварца кварцита в ходе развития пластической деформации последнего. Кроме того: а) установлено, что в ходе развития пластической деформации может изменяться направление деформации относительно оптической оси и происходить смена плоскостей скольжения; б) выявлена достаточно строгая суммарная ориентировка зерен кварца в зоне интенсивной пластичности кварцита: оптические оси практически всех зерен ориентируются таким образом, что образуют с направлением действующего усилия угол $\sim 75^\circ$ (ориентируются под углом $\sim 15^\circ$ к направлению течения кварцевого материала).

Дифрактометрическое исследование. Напомним, что методом микроструктурного анализа можно определить только пространственную ориентировку оптических осей, слагающих породу зерен кварца. Для выявления изменения кристаллографической ориентировки зерен кварца кварцита, испытавшего пластическую деформацию, было предпринято исследование образцов пьезоэлектрическим методом, основанным на преобразовании упругих колебаний в электрические. Результаты изучения показали [33], что пластическая деформация кварцита сопровождается упорядочением ориентировки не только оптических осей, но и кристаллографических элементов зерен кварца, что выразилось в ориентировке их электрических осей [нормалей к призмам второго рода (1120)].

Но при помощи пьезоэлектрического метода можно фиксировать лишь



Ф и г. 37. Природный кварцит – деформационная структура. Шлиф 615 (см. таблицу XII, Б). Результаты проверки гипотезы о равномерном распределении углов между положением оптической оси и длинной осью зерен кварца. Гистограммы распределения углов и характер отклонений от теоретического равномерного распределения:
 а – исходный кварцит; б – кварцит слабо деформированный; в – кварцит, прилегающий к зоне интенсивной деформации

суммарный эффект ориентировки электрических осей агрегата зерен кварца в образце размером не менее $15 \times 15 \times 15$ мм, закономерности же изменения пространственной ориентировки агрегата зерен кварца в ходе развития пластической деформации остались до конца не уточненными. Применив для этой цели ультразвук [33], мы установили, что в направлении действующего усилия скорость $\sqrt{\rho}$ была наименьшей, и это позво-

лило предположить, что в направлении действующего усилия ориентировались направления наименьших модулей Юнга индивидов, но, как и при пьезоэлектрическом методе исследования, вопрос оставался до конца не решенным.

Единственным методом выявления пространственной кристаллографической ориентировки зерен кварца кварцита в настоящее время может быть дифрактометрический метод (метод обратных полюсных фигур), возможность применения которого к уточнению кристаллографической ориентировки зерен кварца агрегата была уже показана в первой части книги.

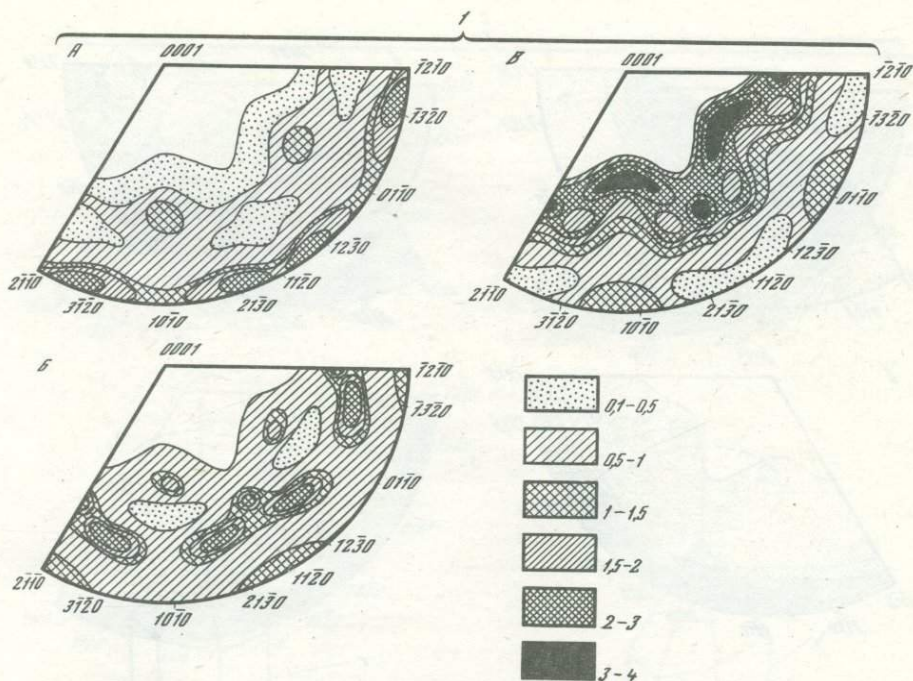
Особенности пространственной кристаллографической ориентировки агрегата зерен кварца рассматриваемого кварцита изучались на семи выпиленных маленьких образцах (размером $4 \times 4 \times 4$ мм), характеризующих различные зоны развития пластической деформации (все сечения образцов перпендикулярны установленным микроструктурным осям a , b , c). Изучалась также ориентировка зерен кварца на отдельных участках больших шлифов, характеризующих всю зону развития пластической деформации (шлифы 477 и 615, таблица XII, XIII, XIV).

Данные дифрактометрического метода показали следующее. В зоне начала пластической деформации (оптически это зона развития В-тектонита) ориентировка кристаллографических элементов зерен кварца, слагающих кварцит, в сечениях ac , av и vc , представлена на фиг. 38. В сечении, перпендикулярном микроструктурной оси c (I, B), отчетливо ориентированы плоскости, наиболее близкие к оптическим осям плоскости ромбоэдров $(10\bar{1}4) - (10\bar{1}5)$ [отражение от плоскости (0001) для кварца, как уже указывалось, запрещены]. Также наблюдается слабое развитие плоскостей призм $(10\bar{1}0)$. В сечениях, перпендикулярных рассмотренному (I, A, B), ориентировка кристаллографических элементов менее однозначна.

Сопоставлением результатов изучения, проведенного на трех взаимно перпендикулярных сечениях, установлено, что в зоне начала пластической деформации пространственная ориентировка кристаллографических элементов, слагающих кварцит зерен кварца, сложная. Данные, полученные дополнительно, показывают, что она может быть различна даже на соседних участках одного и того же сечения.

Изучение пространственной ориентировки деформированных зерен кварца в данном образце в произвольных сечениях показало, что какие-либо системы в ориентировке их кристаллографических элементов отсутствуют. Это лишний раз указывает на необходимость тщательной привязки изучаемых сечений исследуемого образца к осям его текстуры (хотя принципиально возможно оси текстуры образцов, имеющих ориентированное строение, определить на основании изучения ориентировки кристаллитов трех любых взаимно перпендикулярных сечений).

С развитием пластической деформации кварцита степень совершенства пространственной ориентировки кристаллографических элементов зерен кварца возрастает. Так, в зоне с отчетливым проявлением пластической деформации (оптически это зона развития S-тектонита) пространственная ориентировка кристаллографических элементов зерен кварца более совершенна. В этом случае в сечении, перпендикулярном мик-



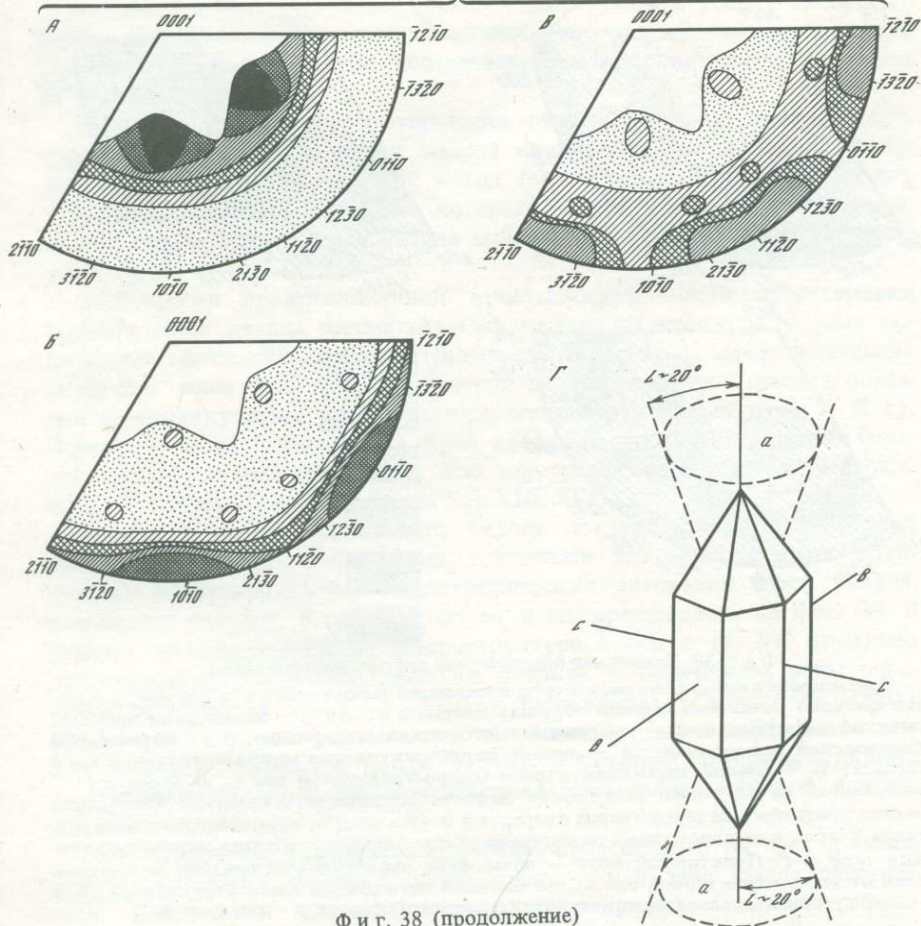
Ф и г. 38. Природная пластическая деформация кварцита

Ориентировка кристаллографических плоскостей зерен кварца ("обратные" полюсные фигуры) различных сечений образцов кварцита из зон: 1 — начала развития пластической деформации, 2 — умеренной пластической деформации, 3 — интенсивной пластической деформации; А — сечение, перпендикулярное микроструктурной оси *a* образца; Б — сечение, перпендикулярное микроструктурной оси *v*; В — оси *c*; Г — построенная на основании результатов дифрактометрического изучения пространственная ориентировка зерен кварца кварцита в форме модели идеализированного кристалла кварца и ее положение относительно установленных в образце микроструктурных осей *a*-*c*. Пунктирный круг — возможное отклонение положения оптических осей от микроструктурной оси *a* (для большей наглядности микроструктурная ось *a* ориентирована вертикально). Условные обозначения — см. фиг. 10

роструктурной оси *a* (сечение *bc*) отчетливо наблюдается ориентировка ромбоздров ($10\bar{1}4$) — ($10\bar{1}5$), т.е. плоскостей, наиболее близких к оптическим осям (2, А).

В сечении, перпендикулярном микроструктурной оси *v*, преимущественно развита ориентировка кристаллографических плоскостей призм первого рода ($10\bar{1}0$), в сечении, перпендикулярном микроструктурной оси *c* (2, В), преобладает ориентировка плоскостей призм второго рода ($11\bar{2}0$). Сопоставление полученных диаграмм показывает, что в зоне с отчетливым проявлением пластической деформации кварцита слагающие его зерна кварца занимают в пространстве вполне определенное положение.

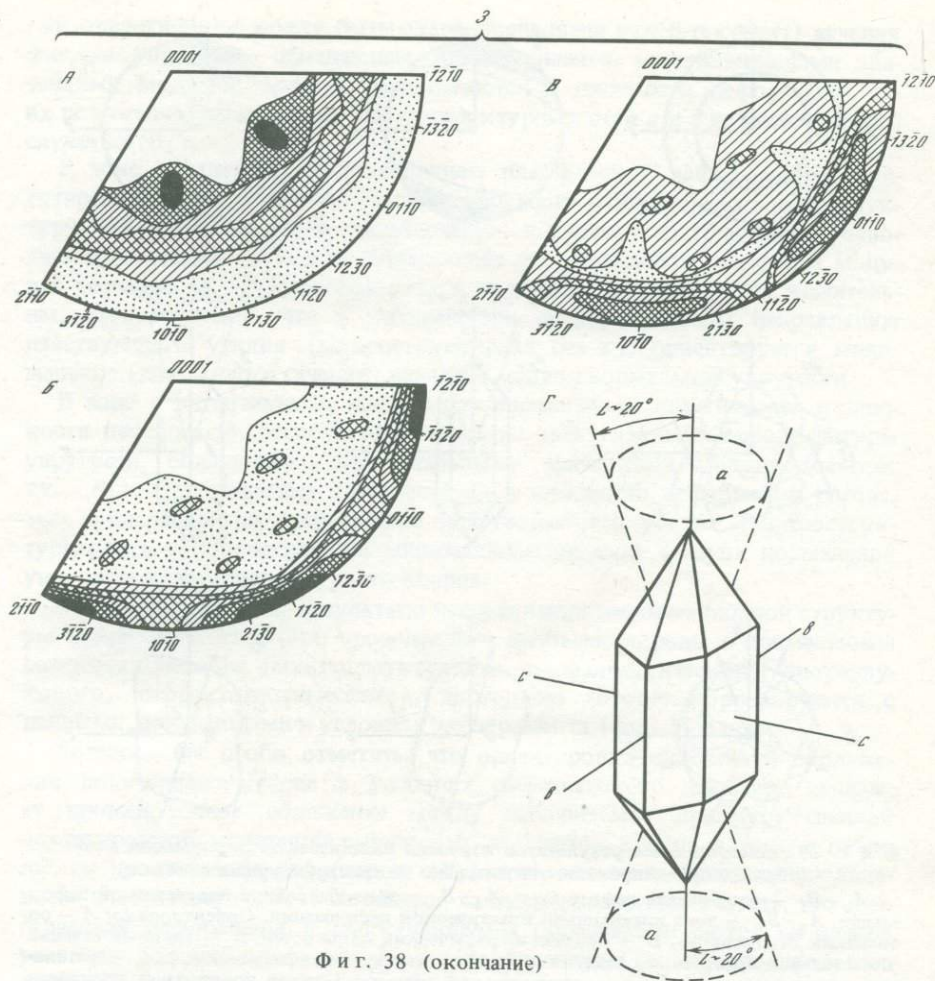
Поскольку ориентировка кристаллографических элементов деформированных зерен кварца высока, ее можно представить в виде модели идеализированного кристалла кварца (принимая во внимание максимум "обратных" полюсных фигур с относительной плотностью выше 1,5 и допуская точность отклонения граней модели от идеального положения



Ф и г. 38 (продолжение)

граней в кристалле на 20° ; последнее связано с тем, что положение оптических осей этим методом определено быть не может). Положение такой модели относительно микроструктурных осей приведено на фиг. 2, Г.

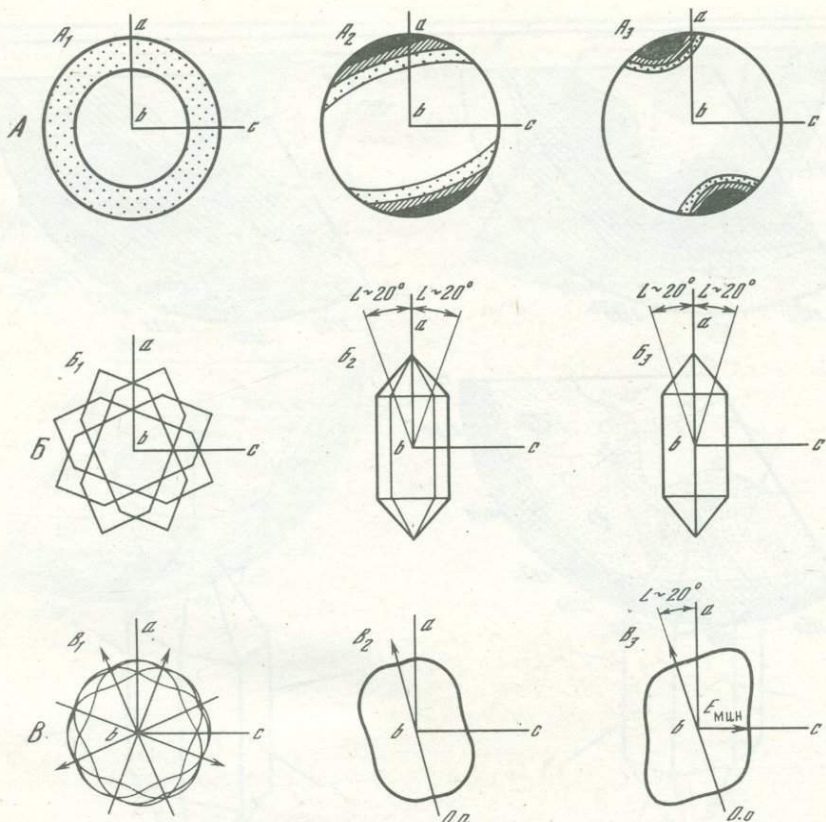
В зоне интенсивной пластической деформации кварцита кристаллографическая ориентировка слагающих его деформированных зерен кварца следующая: в сечении, перпендикулярном микроструктурной оси a (3, А), наибольшую плотность имеют максимумы, образованные нормальными к плоскостям ромбоэдров $(10\bar{1}4) - (10\bar{1}5)$ [напомним, что отражения от плоскости пинакоида (0001) для кварца запрещены]; в сечении, перпендикулярном микроструктурной оси c (3, В), развита в основном кристаллографическая ориентировка плоскостей призм $(10\bar{1}0)$; преимущественное развитие плоскостей $(02\bar{2}1)$ также отмечалось; в сечении, перпендикулярном микроструктурной оси b , преобладает ориентировка плоскостей призм второго рода $(11\bar{2}0)$.



Полученные результаты позволяют представить ориентировку деформированных зерен кварца зоны интенсивной пластической деформации в виде идеализированной модели. Ее ориентировка относительно микроструктурных осей приведена на фиг. 3, Г.

Уточнение пространственной ориентировки указанных моделей на отдельных участках шлифов, характеризующих различные сечения пластически деформированного кварцита, показало (судя по различной интенсивности кривых дифрактограмм данных зон) возможность некоторых колебаний пространственного положения рассматриваемых идеализированных моделей (2, Г и 3, Г) относительно микроструктурных осей a , b , c .

Развитие пространственной ориентировки. Установленная совершенная ориентированная структура кварцита в зоне интенсивного течения свидетельствует о том, что направленное развитие пластической деформации не случайно.



Ф и г. 39. Сопоставление результатов изучения пластической деформации кварцита (образцы ориентированы относительно микроструктурных осей $a-c$)

A_1-B_1 — зона начала деформации, A_2-B_2 — зона умеренной пластической деформации. A_3-B_3 — зона интенсивной пластической деформации. Ориентировка: A — оптических осей кварца, B — кристаллографических плоскостей, B — главных сечений указательной поверхности модуля Юнга низкотемпературного кварца; $O.O.$ — положение оптической оси; E_{min} — минимальное значение модуля нормальной упругости

Уточняя возможную внутреннюю причину, контролирующую однонаправленность развития ориентированного строения деформированной породы, вновь обратимся к упругим свойствам кварца. Заменяя полученные при дифрактометрическом изучении модели пространственного строения породы в форме идеализированного кристалла кварца моделями, представляющими собой указательную поверхность модулей Юнга (фигуру упругости) низкотемпературного кварца, можно получить следующее (фиг. 39). Все рассуждения ведем, исходя из фигуры упругости для левого кварца; нам представляется такой подход правомочным: в существенно кварцевой породе левый и правый кварц встречаются отдельными группами — по 250–300 зерен [112 и др.] и практически с равным успехом при построениях можно использовать и правый и левый кварц.

В зоне начала развития пластической деформации (которая по оптичес-

кой ориентировке может быть охарактеризована как В-тектонит) сечения фигуры упругости, обладающие максимальными и минимальными значениями модулей, хотя и располагаются в плоскости деформации, но их положение относительно микроструктурных осей a и b не фиксировано, случайно (B_1).

В зоне с отчетливым проявлением пластической деформации в ориентировке главных сечений фигуры упругости относительно микроструктурных осей наблюдается упорядочение: в плоскости деформации располагается сечение, хотя и не обладающее экстремальным значением модулей (сечение zx , B_2), но различия в величинах модулей здесь значительны. Примечательно, что в направлении, субпараллельном направлению действующего усилия (микроструктурная ось c), ориентируется минимальное (для данного сечения) значение модуля нормальной упругости.

В зоне с интенсивным, наивысшим проявлением пластичности в плоскости деформации располагается одно из трех главных сечений фигуры упругости, обладающих экстремальными значениями модуля (сечение zy , B_3). Ориентировка этого сечения в плоскости деформации такова, что субпараллельно направлению действовавшего усилия (микроструктурная ось c) ориентируется минимальное значение модуля нормальной упругости низкотемпературного кварца.

Некоторые выводы. Результаты исследования деформационной структуры природного кварцита, проведенного в объеме породы с применением различных методов (микроструктурного, пьезоэлектрического, ультразвукового, дифрактометрического), достаточно хорошо коррелируются с данными, полученными в условиях эксперимента (фиг. 31 и др.).

Хотелось бы особо отметить, что ориентировка плоскостей скольжения, полученная в кварце в условиях сверхвысокого давления, занимает промежуточное положение между наблюдаемой преимущественной ориентировкой кристаллографических элементов кварца в зоне с отчетливым проявлением деформации (B_2) и в зоне с интенсивным проявлением пластичности (B_3). Указанное сходство позволяет считать, что пластическая деформация в сопоставляемых образцах, несмотря на резкое различие условий деформации, предопределялась и контролировалась одним и тем же фактором.

Термодинамически устойчивая ориентировка кварца и кварцита

Вопросы термодинамической устойчивости ориентировки кварца и кварцита в негидростатическом поле напряжений поднимались в работах Р. Зондера [157], В.С. Соболева [91] и др. Начало теоретически обоснованного рассмотрения проблемы может быть связано с теорией Г. Мак Дональда [145]. В 1960 г. им была предложена термодинамическая теория устойчивой ориентировки минералов в поле негидростатического напряжения.

Используя основной закон механики: если система находится в равновесии, то ее потенциальная энергия является минимальной (доказательство этого закона для упругих тел дано в общих работах по упругости), Мак Дональд показал, что равновесная ориентировка упруго-анизотропного

минерала в поле внешних сил в области линейной зависимости "упругая деформация — напряжение" характеризуется тем, что потенциальная энергия внешних сил плюс потенциальная энергия деформации минерала сходится к минимуму.

Как было показано У. Кэмбом [142], теория Мак Дональда не описывает строгого термодинамически равновесия ориентировки минералов: теория описывает механическое равновесие неизотропного тела, способного вращаться, чтобы принять ориентировку, при которой оно будет иметь максимальную упругую энергию.

Вместе с тем подход Мак Дональда оказывается полезным при определении предпочтительной ориентировки упруго-анизотропных индивидов поликристалла в поле внешних сил, в области малых упругих деформаций, поскольку подобное определение практически трудно сделать, используя более строгую термодинамическую теорию.

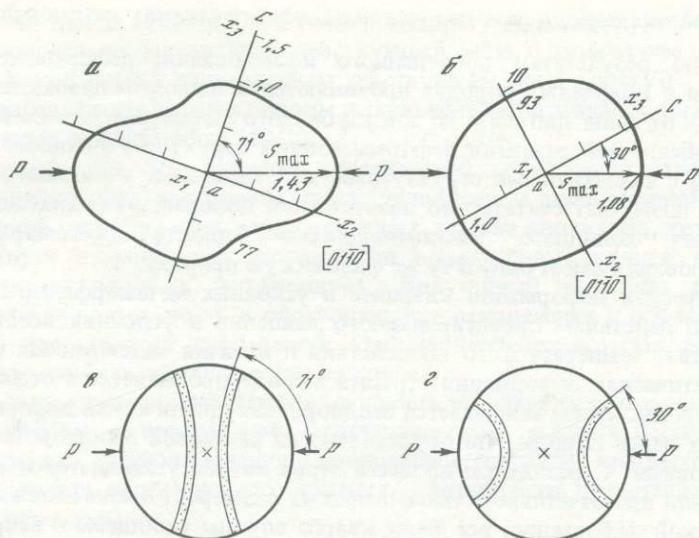
На основании теории Мак Дональда В. Брейсом [119] был проведен расчет термодинамически устойчивой ориентировки низко- и высокотемпературного кварца, кварцевых пород, сложенных α - и β -кварцем, а также кальцита и льда в условиях сжатия (для бесконечно малых деформаций в области линейной зависимости упругой деформации от напряжения).

По В. Брейсу, для поля напряжения, состоящего из одного компонента (условие простого сжатия), термодинамически устойчивой ориентировка кварца будет в том случае, если нормально к вектору напряжения для кварца низкотемпературного (25°C) располагается плоскость $(02\bar{2}1)$, а для высокотемпературного кварца (при 600°) — плоскость $(10\bar{1}2)$, т.е. в обоих случаях параллельно действующему усилию будет ориентировано направление, соответствующее наибольшей величине модуля податливости.

Ориентировка агрегата зерен кварца породы в рассматриваемом случае на диаграммах оптической ориентировки имеет вид поясных узоров, поскольку (по Брейсу) зерна кварца друг относительно друга не ориентированы особым способом; выходы оптических осей зерен кварца на стереографической поверхности располагаются по дугам малых кругов.

Относительно направления действующего усилия радиус дуги малого круга для низкотемпературного кварца составляет угол $\sim 70^\circ$, для высокотемпературного $\sim 30^\circ$; с повышением температуры величина радиуса должна уменьшаться [109 и др.]. Схема, иллюстрирующая рассмотренные представления о термодинамически устойчивой ориентировке кварца и кварцитов в условиях одноосного сжатия, приведена на фиг. 40.

Расчет ориентировки агрегата зерен в общем поле напряжения (в условиях сложно-напряженного сжатия) — задача более сложная, так как по Брейсу невозможно учесть влияние каждого компонента, рассмотренного отдельно, или получить упрощение разделением тензора напряжения на среднее нормальное напряжение и девитационную часть. Отличия в ориентировке зерен кварца породы от рассмотренного ранее случая простого одноосного сжатия могут заключаться в появлении максимумов вокруг направления максимального напряжения сжатия приблизительно на тех же самых угловых расстояниях, что и в ранее рассмотренном случае, а также в небольшом угловом изменении положения дуг на стереографической проекции.



Фиг. 40. Схема, иллюстрирующая представления В. Брейса [119] о термодинамически устойчивой ориентировке кварца (а и б) и агрегата кварцевых зерен (в и г) в условиях одноосного сжатия; P — направление действующего усилия

а и б — сечения фигур податливости кварца в плоскости x_2-x_3 (zy) и их ориентировка относительно действующего (P) усилия: а — низкотемпературный кварц, б — кварц высокотемпературный. Фигуры податливости даны в одном масштабе (единица соответствует 10^{-12} см/дин; S_{max} — максимальное значение модуля податливости); в и г — предполагаемая ориентировка агрегата зерен низкотемпературного (в) и высокотемпературного (г) кварца (крест — выхода оптической оси)

Несмотря на высказанные Мак Дональдсом и Брейсом сомнения относительно возможности применения разработанных ими моделей термодинамически устойчивой ориентировки минералов в геологической практике, проведем сопоставление рассчитанных моделей (модели идеальных упруго-анизотропных тел) с установленной нами оптической ориентировкой индивидов в зоне интенсивной пластической деформации кварцита. Сопоставление показало следующее.

Ориентировка зерен кварца в зоне наивысшего проявления пластической деформации достаточно хорошо коррелируется с рассчитанными моделями устойчивой ориентировки кристалла кварца в области обратимых упругих деформаций в условиях сжатия.

Рассчитанные модели устойчивой ориентировки кварцевых зерен породы не соответствуют пространственной ориентировке интенсивно пластически деформированного кварцита, поскольку диаграммы оптической ориентировки индивидов в этом случае не характеризуются узором в виде поясов по дугам малых кругов (фиг. 40, в, г). Показанное несоответствие — наглядная иллюстрация результатов термодинамического подхода к уточнению предпочтительной ориентировки агрегата упруго-анизотропных кристаллов в поле внешних сил: ориентировка устанавливается на основе упругих констант минерала, а знание механизма, с помощью которого она достигается, не является при данном подходе обязательным.

Судя по результатам проведенного исследования, деформационные структуры в кварцевых породах проявляются в широком диапазоне P - T условий — от зоны эпигенеза до зон глубинного метаморфизма. Сопоставление особенностей развития деформационных структур в условиях метаморфизма с аналогичными структурами, наблюдаемыми в условиях литификации, позволяет считать, что пластическая деформация поликристалла в условиях "холодного" (литификация) и "горячего" (метаморфизм) деформирования имеет одну и ту же физическую природу.

Пластическая деформация кварцита в условиях метаморфизма происходит под действием ориентированного давления в условиях всестороннего сжатия, температурного воздействия и наличия межзеренных флюидов. Пластическая деформация агрегата вначале проявляется в отдельных зернах породы. Затем наблюдается неоднородная пластическая деформация отдельных зерен породы, что обусловлено их различной пространственной ориентировкой. С развитием процесса зерна кварца удлиняются в одном направлении при отчетливом уменьшении их размеров. В зоне интенсивной пластической деформации все зерна кварца породы уплощены в направлении, перпендикулярном направлению действовавшей силы, и однозначно ориентированы в направлении течения материала. Размеры зерен существенно меньше, чем в исходной породе, что отражается почти в 100% увеличении удельной протяженности границ зерен в единице объема (по сравнению с исходной породой).

Процесс изменения пространственного строения породы в ходе развития пластической деформации однозначно фиксируется впервые широко примененными в петрографической практике стереометрическими оценочными параметрами и особенно наглядно — кривыми распределения двугранных углов. В зоне наиболее полного проявления пластической деформации для указанной кривой характерны два максимума (при 20° и 180°), максимум при 120° отсутствует.

В целом общий ход развития пластической деформации в кварцевом материале (с неметаллическим типом связей) в своей основе не отличается от аналогичного явления, наблюдаемого в металлах и их сплавах.

Проведенное изучение особенностей развития пластической деформации кварцита показало, что это — не только изменение в условиях ориентированного сжатия структурных признаков породы и ее физико-механических свойств: указанные изменения являются следствием более глубинного явления — закономерной пространственной переориентировки всех слагаемых пород упруго-анизотропных индивидов.

Результаты микроструктурного анализа показали, что переориентировка оптических зерен агрегата идет по следующей схеме: от ориентировки исходной породы через ориентировку типа R-тектонита к B-тектониту и далее к ориентировке типа монокристалл (типа S-тектонита). Указанная переориентировка сопровождается упорядочением всех кристаллографических плоскостей деформируемых зерен кварца (данные дифрактометрического исследования). В зоне наиболее интенсивного проявления пластической деформации практически все зерна агрегата оказываются ориентированными таким образом, что одно из направлений, характеризующее минималь-

ным значением модуля Юнга (низкотемпературный кварц), ориентируется субпараллельно направлению действующей силы. В этом случае угол между оптической осью и направлением действующей силы равен 70° ; угол между направлением течения породы и положением оптических осей деформированных зерен порядка $10-20^\circ$.

Установлено, что развитие пластической деформации агрегата однонаправлено. Оно предопределяется становлением закономерной пространственной ориентировки всех слагающих агрегат индивидов, которое соответствует теоретически рассчитанной ориентировке кварца (в области обратимых упругих деформаций). Полученный результат показывает главное — возможность и обоснованность привлечения к объяснению природы пластической деформации кристаллического агрегата анизотропии упругих свойств слагающих его индивидов.

В свете приведенных данных, сущность развития пластической деформации породы — возвращение кристаллического агрегата посредством необратимого формоизменения в равновесное состояние при выходе из него в результате тектонического явления — может быть представлена следующим образом.

Изменение внешних условий вызывает ответную реакцию породы, в основе которой лежит ответная реакция слагающих ее индивидов. Ответная реакция индивида контролируется анизотропией его упругих свойств. Она предопределяет пути и механизмы уменьшения "наведенной" внешним воздействием упругой энергии индивида в сторону устойчивого состояния. Последнее осуществляется в рассматриваемых условиях посредством пластической деформации. Весь смысл необратимого формоизменения индивида при пластической деформации заключается в пространственной переориентировке его кристаллической решетки в стационарное (в пределе — равновесное), соответствующее минимуму упругой энергии состояние в системе индивид — горная порода в новых, изменившихся условиях (механизм явления дислокационный).

Как и во всяком термодинамически оправданном процессе, в процессе пластической деформации выигрыш энергии должен превосходить ее проигрыш. Исходя из этого представления, общеизвестное увеличение упругой энергии за счет нарушений и искажений кристаллических решеток индивидов, возникающее при пластической деформации агрегата, должно быть значительно меньше, чем общее уменьшение упругой энергии, происходящее за счет пространственной переориентировки кристаллических решеток индивидов. В свете приведенных данных, общеизвестные при пластической деформации кристаллического тела нарушения регулярности кристаллических структур индивидов, развитие в них внутризеренных плоскостей скольжения, так же как и увеличение удельной протяженности границ зерен в единице объема породы, являются не причиной, а следствием развития пластической деформации. Указанные особенности процесса отражают не природу явления, а лишь механизмы, с помощью которых посредством переориентировки кристаллических решеток индивидов достигается стационарное состояние пород в изменившихся внешних условиях.

И последнее. Ответная реакция индивида на внешнее воздействие, контролируемая анизотропией его упругих свойств, рассматривается автором

в качестве основного структурообразующего фактора. Фактор структурообразования объясняет сущность однонаправленного развития пластической деформации горной породы.

Поскольку теория пластичности кристаллических материалов до сих пор практически не создана, указанный фактор структурообразования может быть положен в основу ее разработки.

РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ КВАРЦЕВЫХ ПОРОД

Результаты изучения метаморфизованных горных пород показывают, что в них отчетливо выраженные деформационные структуры весьма редки. При изучении зеркал скольжения, будинажа, мелкой складчатости можно видеть, что, несмотря на четкие деформационные текстурные признаки, структурные особенности породы практически всегда характеризуют иной процесс — рекристаллизацию (под рекристаллизацией подразумевается образование новой зернистой структуры в поликристаллическом претерпевшем пластическую деформацию материале).

Представления о рекристаллизации кварцевых пород существуют столетия. Однако эксперименты, позволяющие изучать рассматриваемое явление в условиях опыта, стали проводиться сравнительно недавно [39, 139, 160 и др.]. Попытки уточнить природу явления рекристаллизации кварцевых пород не выходят за рамки традиционных представлений в смежных областях знаний. Последнее не удивительно, поскольку процесс рекристаллизации кварцевого материала весьма близок к явлению, интенсивно изучаемому в металлах и сплавах (в связи с влиянием возникающей при рекристаллизационном отжиге анизотропии свойств на эксплуатационные свойства материалов).

В указанной области знаний при изучении явления рекристаллизации выделяют два этапа — возврат и собственно рекристаллизация. Возврат — все изменения тонкой структуры, не сопровождаемые изменением структурных особенностей исходного пластически деформированного материала — включает две стадии: отдых (изменения на уровне дислокационных структур) и полигонизацию (стадия возврата, на которой в деформированных зернах наблюдается формирование малоугловых границ — результат перегруппировки дислокаций).

Этап рекристаллизации содержит три стадии развития: рекристаллизацию первичную, лежащую в основе смены исходной деформационной структуры структурой гранобластовой, рекристаллизацию собирательную и рекристаллизацию вторичную; в последних случаях рост зерен происходит за счет других путем перемещения их границ в твердой фазе. В процессе первичной рекристаллизации, который может идти как после, так и в течение деформации, исходный деформированный материал, обладающий повышенным уровнем энергии упругих напряжений, замещается агрегатом равновеликих, свободных от напряжения зерен. Пространственная ориентировка индивидов новообразованного агрегата может повторять исходную ориентировку деформационной структуры и значительно отличаться от нее.

Для объяснения структурных особенностей, возникающих при рекристаллизации агрегата, разработаны гипотезы ориентированного зарождения,

избирательного роста, комбинированная гипотеза, учитывающая особенности ориентированного зарождения и избирательного роста. Все указанные гипотезы учитывают лишь сам факт существования рассматриваемых явлений [15 и др.] .

Традиционно роль анизотропии физико-механических свойств отдельно упруго-анизотропного индивида, влияние особенностей его кристаллической структуры на развитие рекристаллизации агрегата не учитываются.

В настоящем разделе в соответствии с общим планом работы вначале приводятся экспериментальные данные об общих закономерностях развития метаморфогенных рекристаллизационных структур кварцевых пород, а затем излагаются результаты изучения природных объектов. На основе полученных данных с учетом реальной кристаллофизической структуры кварца обсуждается возможная физическая природа рассматриваемого явления.

Экспериментальное уточнение причин, контролирующих становление рекристаллизационных структур

В настоящем разделе предпринята попытка уточнить в условиях опыта особенности развития пространственной ориентировки новообразованных рекристаллизационных структур при условии, что исходный материал обладает деформационной структурой с однозначной пространственной ориентировкой слагающих его зерен. Постановка этих опытов вызвана отсутствием среди исследователей единого мнения о роли ориентированного давления в развитии пространственной ориентировки индивидов рекристаллизационной структуры и о связи пространственной ориентировки индивидов исходной деформационной и новообразованной рекристаллизационной структур между собой [15, 150] .

Методика и исходные образцы

В основу работы положены результаты проведенного ранее эксперимента по рекристаллизации пластически деформированного кварцита. Отличительной особенностью настоящих опытов от проведенных ранее является различная установка пространственной ориентировки индивидов исходных образцов относительно направления компоненты осевого сжатия [39] .

Из рассмотренного ранее кварцита зоны интенсивной пластической деформации (таблица XII, в) были выпилены образцы кубической формы размером $4 \times 4 \times 4$ мм, ориентированные относительно микроструктурных осей *a*, *b*, *c*. Степень совершенства ориентировки этих образцов несколько варьировала, поэтому для каждого опыта исходная ориентировка зерен кварца в кубических образцах, установленная дифрактометрическим методом, учитывалась (фиг. 41, 1 и фиг. 42, 1) .

Ранее проведенное изучение явления рекристаллизации природно-деформированного кварцита в условиях опыта (таблица V) показало, что процесс начинается с появления отдельных мелких зерен (группы зерен) в наиболее напряженных (деформированных) участках и заканчивается сменой деформационной структуры агрегатом равновеликих зерен без волнистого, облачного угасания (рекристаллизационной структуры). Хотя по данным морфо-

логического изучения новообразованная по исходной деформационной структуре структура гранобластовая и была равновесной, однако пространственная ориентировка индивидов этой структуры, как показало микроскопическое изучение, могла быть различной — в одном случае возникшая ориентировка новообразованных зерен, судя по их угасанию, была более или менее однородной, а в другом наблюдалось неоднородное угасание в пределах отдельных групп зерен.

С учетом этих данные при проведении настоящей серии опытов по рекристаллизации направление компоненты осевого сжатия ориентировалось перпендикулярно сечениям образцов с преобладающим развитием следующих кристаллографических плоскостей зерен кварца породы: серия опытов *a* ($10\bar{1}4$)—($10\bar{1}5$) и опытов *б* ($10\bar{1}0$)—($11\bar{2}0$). Для снятия появлявшейся после опытов небольшой кривизны на поверхностях образцов, параллельных компоненте осевого сжатия, а также для снятия возможного влияния зон контакта образца с футеровкой камеры высокого давления образцы после опыта сошлифовывались примерно на 0,5 мм.

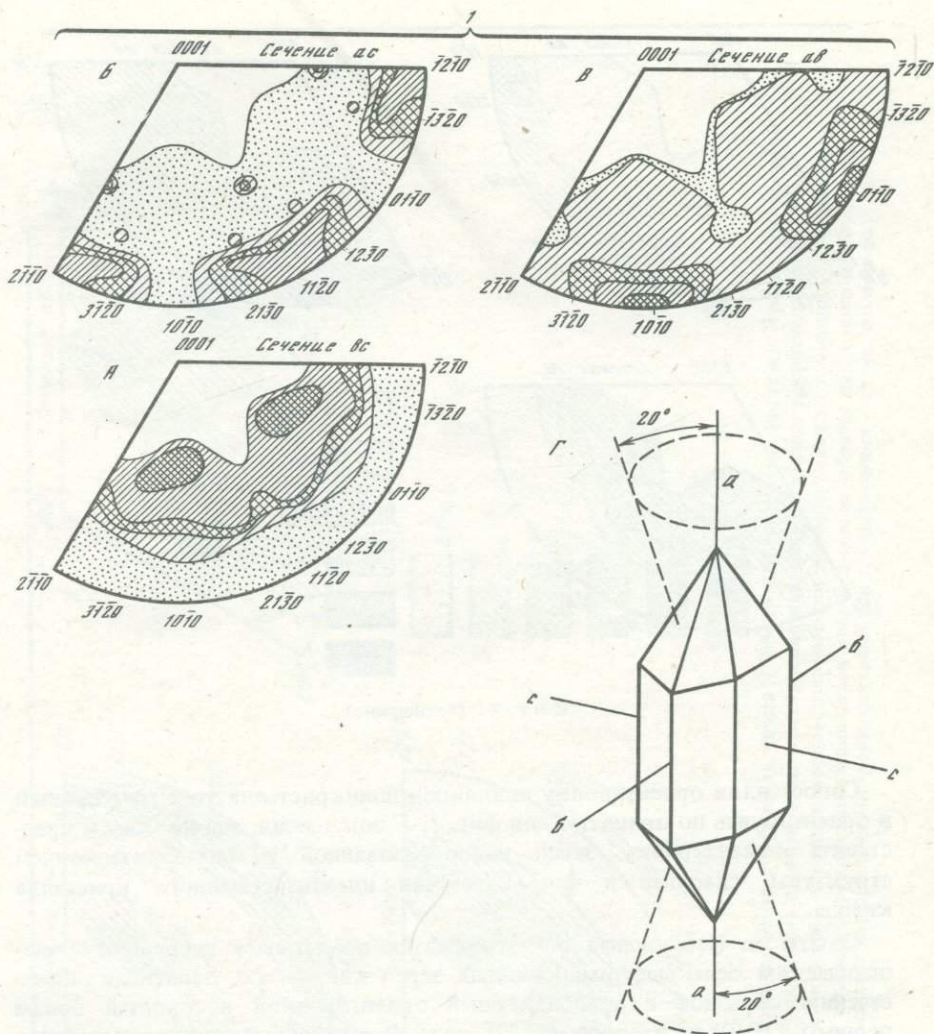
Результаты опытов

Опыты *a*. Компонента осевого сжатия ориентирована перпендикулярно сечению образцов с преобладающей ориентировкой плоскостей ромбоздров ($10\bar{1}4$)—($10\bar{1}5$), т.е. практически субпараллельно оптическим осям зерен кварца.

Кристаллографическая ориентировка зерен кварца исходного образца пластически деформированного кварцита приведена на фиг. 41, 1. Нетрудно видеть (*I, A*), что перпендикулярно микроструктурной оси *a* ориентированы преимущественно плоскости ромбоздров ($10\bar{1}4$)—($10\bar{1}5$) [отражения от плоскости пинакоида (0001) для кварца запрещены]. В сечении, перпендикулярном оси *c*, преимущественно располагаются плоскости призм первого рода ($10\bar{1}0$) (*I, B*). Параллельно сечению, перпендикулярному микроструктурной оси *b*, ориентированы в основном плоскости призм второго рода ($11\bar{2}0$) (*I, B*).

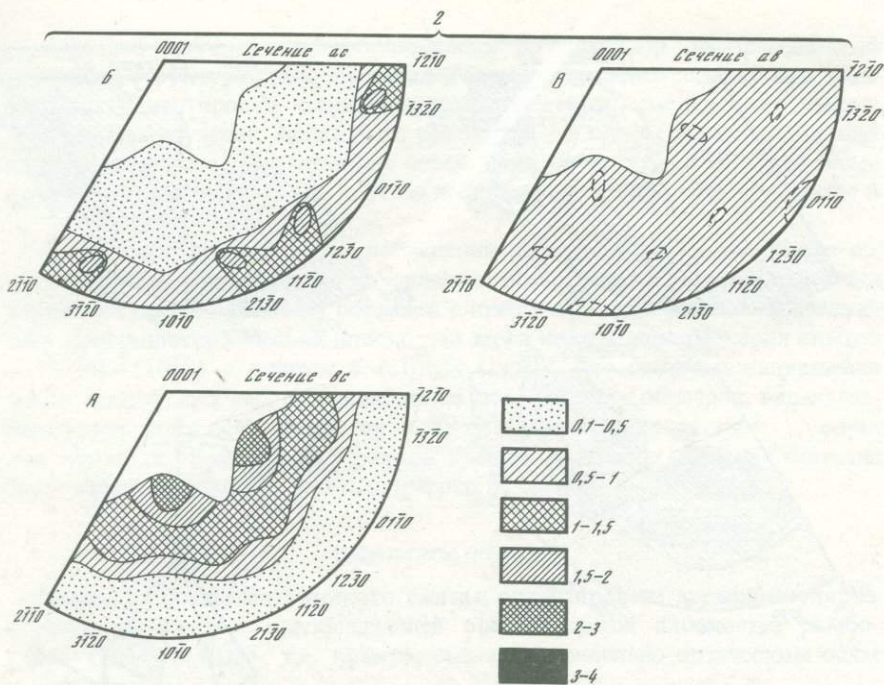
Четкая ориентировка кристаллографических элементов на трех взаимно перпендикулярных плоскостях позволяет представить положение зерен в исходной породе в виде модели идеализированного кристалла кварца (если принять, как это было сделано ранее, во внимание максимумы "обратных" полюсных фигур с относительной плотностью выше 1,5 и допустить отклонения грани модели от идеального положения граней в кристалле на 20°), а также ориентировать эту модель относительно микроструктурных осей *a*, *b*, *c*, установленных на основании микроскопического изучения образцов (*I, Г*).

После опыта ориентировка новообразованных зерен кварца ухудшилась. Так, в плоскости микроструктурных осей *bc* площадь максимумов, характеризующих развитие плоскостей ромбоздров ($10\bar{1}4$)—($10\bar{1}5$) значительно сократилась (*2, A*). В сечении *ac* после опыта уменьшились и площадь и интенсивность максимумов, характеризующих ориентировку плоскостей призм ($11\bar{2}0$) (*I, B* и *2, B*). В сечении микроструктурных осей *ab* четкая исходная ориентировка плоскостей призм ($10\bar{1}0$) индивидов (*I, B*) после опыта вообще исчезла, *2, B*).



Ф и г. 41. Рекристаллизация кварцита в условиях опыта ("обратные" полюсные фигуры). Пример ухудшения (по сравнению с исходным) ориентированного строения кварцита в процессе рекристаллизации

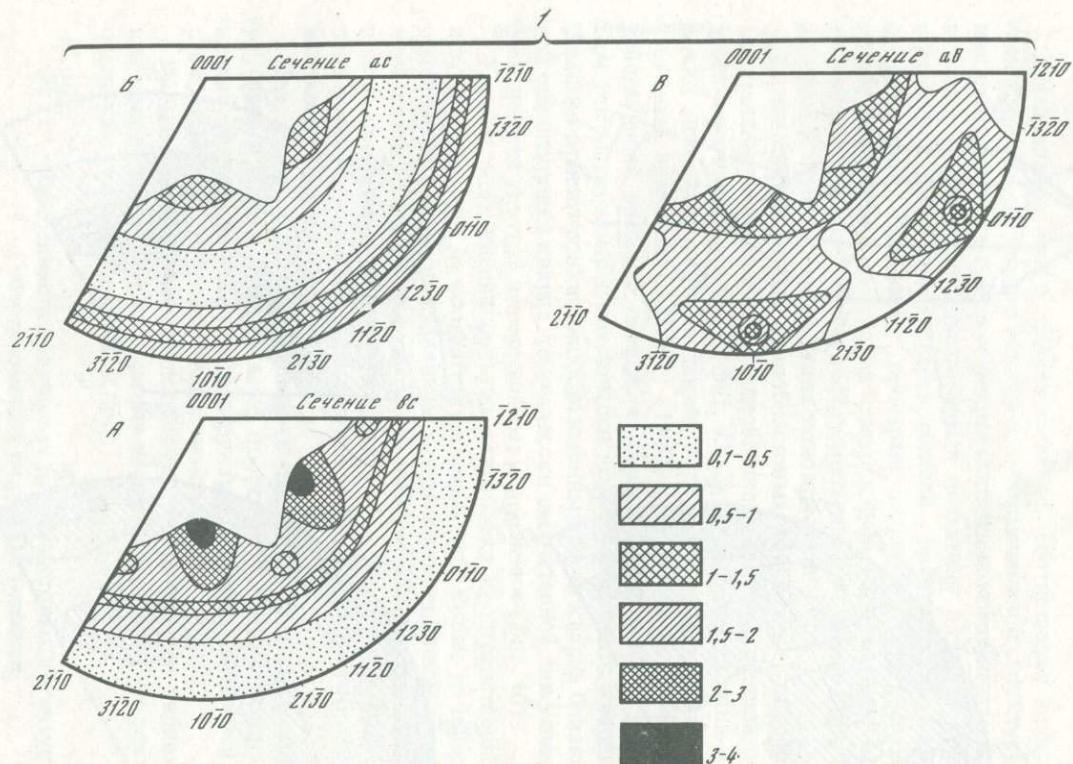
1 — ориентировка зерен кварца исходного пластически деформированного кварцита, 2 — ориентировка новообразованных зерен кварца в том же образце после опыта; А-В — сечения образца, перпендикулярные соответствующим трем микроструктурным осям (а, б, с); Г — идеализированная модель ориентировки зерен кварца кварцита, построенная на основании результатов дифрактометрического изучения, и ее положение относительно микроструктурных осей а, б, с. Пунктирный круг — возможное отклонение оптической оси модели от направления а-а (по данным "обратной" полюсной фигуры сечения А). Справа внизу — шкала плотности выходов нормалей (по сравнению с изотропным образцом). Направление компоненты осевого сжатия параллельно микроструктурной оси а



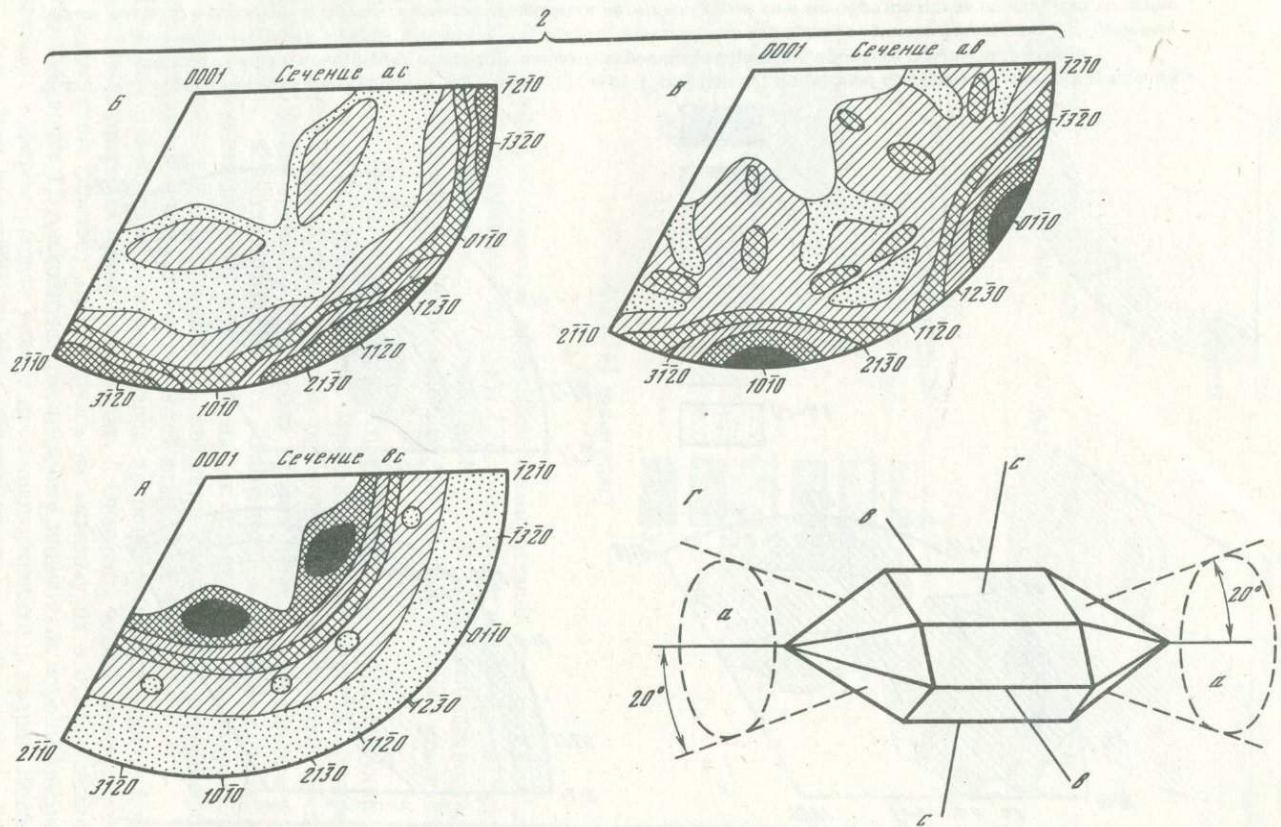
Сопоставляя ориентировку индивидов поликристалла этих трех сечений и ориентируясь по принятым для фиг. 1, Г допущения, мы не можем представить ориентировку зерен новообразованной рекристаллизационной структуры кварцита в форме модели идеализированного кристалла кварца.

Опыты б. Компонента осевого сжатия прилагалась перпендикулярно оптическим осям деформированных зерен кварца, т.е. перпендикулярно сечению образцов с преобладающей ориентировкой плоскостей призм первого ($10\bar{1}0$) и второго ($11\bar{2}0$) рода. В этих опытах пространственная ориентировка кристаллографических элементов новообразованных в процессе рекристаллизации зерен кварца по сравнению с ориентировкой зерен исходного деформированного кварцита была более совершенна. Результаты такого опыта рассматриваются ниже (фиг. 42).

Исходная ориентировка зерен кварца природного пластически деформированного кварцита приведены на фиг. 1. Она менее четкая, чем в образцах предыдущих опытов; ориентируясь на максимумы с относительной плотностью выше 1,5, исходную ориентировку индивидов породы трудно представить в форме модели идеализированного кристалла кварца. После опыта в каждом изученном сечении образца ориентировка кристаллографических элементов зерен кварца (по сравнению с исходной, 1) стала более совершенной (2). При условии принятых для фиг. 1, Г допущений, ориентированное строение новообразованной структуры может быть пред-



Ф и г. 42. Рекристаллизация кварцита в условиях опыта ("обратные" полюсные фигуры). Пример улучшения (по сравнению с исходным) ориентированного строения кварцита в процессе рекристаллизации
 1 — ориентировка зерен кварца в образце исходного пластически деформированного кварцита, 2 — ориентировка новообразованных в процессе рекристаллизации зерен кварца в том же образце после опыта. Направления компоненты осевого сжатия параллельно микроструктурной оси с. Обозначения — те же, что и на фиг. 41



Ф и г. 42 (окончание)

ставлено в форме модели фиг. 2. В рассмотренном примере установлено, что пространственная ориентировка новообразованных зерен кварца в определенных пределах наследует ориентировку исходной деформационной структуры.

Некоторые итоги

Установлено, что в зависимости от соотношения пространственной ориентировки индивидов исходной деформационной структуры и направления действующей в процессе рекристаллизации компоненты осевого сжатия в одних и тех же условиях опыта возможно развитие гранобластовых структур с различной пространственной ориентировкой индивидов — от ориентировки, сходной с пространственной ориентировкой индивидов пород осадочных, до весьма совершенной, однозначной ориентировки, наблюдаемой в пластически деформированном кварците (типа S-тектонит); назовем ее ориентировкой "типа монокристалл".

В новообразованных гранобластовых структурах, обусловленных рекристаллизацией, появление однозначной пространственной ориентировки зерен типа изображенной на фиг. 42, 2, Г наблюдается лишь в случае установки исходного образца таким образом, чтобы кристаллографические элементы индивидов $(10\bar{1}0)$, $(11\bar{2}0)$ располагались субперпендикулярно действующей внешней силе, т. е. были равновесны для данных условий. При рекристаллизации пластически деформированного кварцита пространственная ориентировка новообразованных зерен кварца близка к равновесной ориентировке кварца, теоретически рассчитанной для условий линейной зависимости упругой деформации от напряжения (фиг. 40).

Если в поле внешних сил ориентировка пространственного строения исходной породы не соответствует указанной выше, то пространственная ориентировка новообразованной рекристаллизационной структуры выражена слабо. В последнем случае, по данным микроскопического изучения, пространственная ориентировка, как и в случае осадочных пород, обусловлена ориентировкой отдельных групп зерен, различным образом ориентированных в пространстве.

При увеличении экспозиции (и параметров) опыта можно ожидать улучшения степени совершенства пространственного строения новообразованной рекристаллизационной структуры, приближающегося в пределе к равновесной ориентировке типа монокристалл.

На возможность пространственного упорядочения индивидов породы при рекристаллизации пластически деформированного кварцита в условиях опыта уже указывалось [160 и др.].

Особенности природных гранобластовых структур, обусловленных рекристаллизацией, в свете результатов проведенных опытов

В данном разделе рассматриваются три примера развития гранобластовых структур в кварцевом материале: особенности кварцевого материала зеркал скольжения, вторичный рост зерен кварца в твердом агрегате и рекристаллизационные структуры кварцевого материала кварц-диопсидовых пород Юго-Западного Прибайкалья.

*Структурные особенности
кварцевого материала зеркал скольжения*

Изучался образец с природными весьма совершенными плоскостями скольжения в кварцевом материале, предоставленный для исследования Л.И. Лукиным (ИГЕМ АН СССР). Место взятия: свинцово-цинковое месторождение Бурон (Северный Кавказ) из зеркал скольжения на поздних кварцевых прожилках, секущих рудную зону (западная часть месторождения).

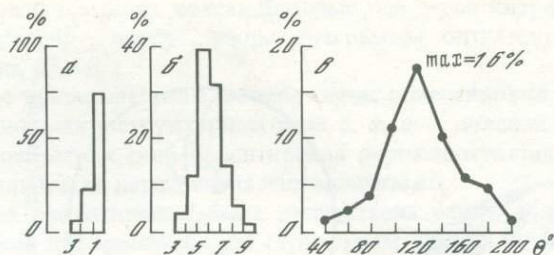
В образце макроскопически отчетливо различаются две части. Нижняя, темная, представленная кварц-хлоритовым материалом крутопадающей зоны нарушения, включает рассматриваемый кварцевый прожилок с зеркалами скольжения. Кварцевый прожилок имеет мощность до 3 см. Верхняя граница прожилка — типичная поверхность скольжения: гладкая, несколько волнообразно изгибающаяся, приполированная поверхность с параллельными друг другу и ориентированными в направлении скольжения штрихами и бороздами (глубина и ширина последних — первые миллиметры); обычные поперечные уступы и скрытые зеркала скольжения.

Проведенное микроскопическое изучение показало, что кварцевый материал зеркал скольжения ни на одном из трех взаимно перпендикулярных сечений не обладал деформационной структурой (таблица XVI, а, б). Кварцевый материал — агрегат изометричных зерен различной крупности (от сотых долей миллиметра до 1–2 мм). Наличие на отдельных участках крупных, среднего размера и мелких зерен кварца в агрегате может указывать на развитие более поздней стадии процесса — собирательной и вторичной рекристаллизации.

Резко отлична от рассмотренной структура линзовидных скоплений зерен кварца, кварц-хлоритового материала, вмещающего зеркала скольжения. Образующие ее зерна кварца уплощены, вытянуты в направлении, параллельном плоскости скольжения, обладают резким аномальным угасанием и изогнутыми, взаимопроникающими границами, характерными для отчетливо развитых деформационных структур.

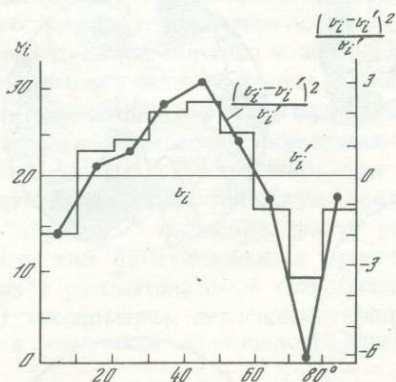
Проведенное изучение морфологических особенностей кварцевого материала прожилка с зеркалами скольжения показало, что границы зерен ровные, четкие; преобладающие формы зерен в плоских сечениях — пяти- и шестиугольные; кривая распределения двугранных углов однозначно приближается к кривой, характерной для равновесной гранобластовой структуры (фиг. 43).

Результаты изучения равновесной формы отдельных зерен рекристаллизационной гранобластовой структуры (на основании структурных карт) позволяют считать, что внешний "чехол" граней отдельного зерна кварца образован иррациональными поверхностями ограничения, в основном не имеющими четкой кристаллографической привязки. Результаты изучения угловых соотношений (длинная ось зерна — оптическая) показали следующее (фиг. 44). На гистограмме, построенной на основе замеров в крупных зернах можно видеть, что намечается весьма четкий максимум в интервале 30–50°. Проверкой полученных данных с позиций гипотезы равномерного распределения установлено, что данное распределение не соответствует равномерному (вычисленное значение $\chi^2 = 16,44$, табличное значение



Ф и г. 43. Характеристика структуры кварцевого материала зеркал скольжения на основе результатов изучения морфологических признаков

a — гистограмма кривизны границ зерен; *b* — гистограмма форм зерен, наблюдаемых в шлифе; *c* — кривая распределения двугранных углов

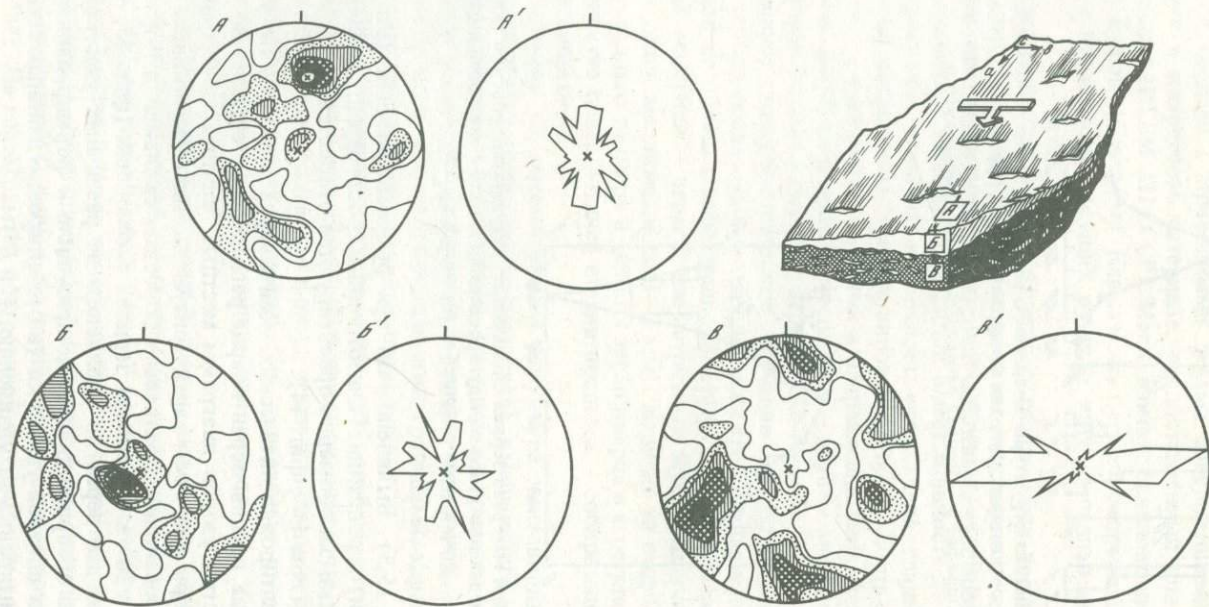


Ф и г. 44. Кварцевый материал зеркал скольжения. Результаты проверки гипотезы о равномерном распределении углов между простиранием оптических осей и длинными осями зерен кварца. См. подпись к фиг. 6

$\chi^2_{0,05; 8 \text{ ст. св}} = 15,5$). Выявлено, что при рекристаллизации (вторичной рекристаллизации) происходит анизотропный рост зерен, длинные оси зерен статистически закономерно ориентируются относительно оптических осей зерен (под углом 45° ; фиг. 44).

Изучение ориентировки оптических осей кварца показало, что в пространстве отдельные группы зерен кварца расположены однозначно, на что указывало сходство узоров диаграмм местных, частных, обзорных и общих. В целом узоры диаграмм характеризуются одним отчетливым максимумом, ориентированным параллельно бороздам скольжения и наклоненным под углом $\sim 20^\circ$ к плоскости зеркала скольжения (фиг. 45, *A* и *B*). Ориентировка тех же зерен по удлинению на различных участках была различной, что на обзорной диаграмме приводило к формированию узора, характерного для плотной упаковки (в ориентировке длинных осей зерен отсутствует ориентировка по удлинению, *A'* и *B'*).

Резко отлична от рассмотренной ориентировка зерен кварца во вмещающем зеркале скольжения кварц-хлористовом материале. Здесь на узоре диаграммы оптической ориентировки отмечается тенденция к поясному расположению выходов оптических осей с формированием отдельных



Ф и г. 45. Зеркала скольжения. Блок-схема образца и результаты микроструктурного анализа (обзорные диаграммы — 100 замеров)

A и A' — ориентировка зерен кварца кварцевого прожилка с поверхностью скольжения; сечение, перпендикулярное микроструктурной оси c ; B и B' — сечение, перпендикулярное микроструктурной оси a ; B и B' — ориентировка зерен кварца в кварц-хлоритовом материале (в сечении, перпендикулярном микроструктурной оси a); $A-B$ — диаграммы оптической ориентировки кварца (изолинии: $1-2-3 > \%$; $\max = 5\%$); $A'-B'$ — диаграммы ориентировки кварца по удлинению. Стрелка показывает направление смещения верхнего блока относительно данной плоскости. Квадраты — места взятия шлифов

максимумов в пределах пояса. Длинные оси зерен кварца ориентированы перпендикулярно "поясу" узора диаграммы оптической ориентировки зерен кварца (B и B').

Наиболее примечательна в данном случае ориентировка узоров диаграмм относительно микроструктурных осей a , b , c — поясной узор диаграммы выходов оптических осей ориентирован перпендикулярно оси a ; ориентировка длинных осей параллельна направлению bc .

Подобная ориентировка была рассмотрена ранее (фиг. 36), в разделе, посвященном деформационным структурам. Там же было показано, что подобная ориентировка (B -тектонит) отражает достаточно интенсивную стадию развития пластической деформации; по узорам диаграмм в данном случае можно однозначно установить направление действующей силы — в направлении микроструктурной оси c .

Дифрактометрическое изучение проводилось на пяти образцах кварцита (размером $6 \times 6 \times 6$ мм), характеризующих зону развития плоскостей скольжения. Перед съемкой образцы с зеркалами скольжения предварительно пришлифовывались до исчезновения борозд.

"Обратные" полюсные фигуры, характеризующие ориентировку индивидов породы на трех взаимно перпендикулярных сечениях (привязанных к микроструктурным осям, установленным для образца), указывают на достаточно четкую кристаллографическую ориентировку зерен кварца. Сопоставление "обратных" полюсных фигур различных сечений между собой показывает, что пространственная ориентировка кристаллографических элементов в рассматриваемой гранобластовой структуре (рекристаллизационной) закономерна: перпендикулярно микроструктурной оси c ориентируются в основном кристаллографические плоскости $(10\bar{1}0)$, $(11\bar{2}0)$.

Полученные данные подтверждают представления о пространственной ориентировке зерен породы, установленные на основе результатов изучения оптической ориентировки.

Суммируя результаты проведенного исследования, можно видеть, что в результате рекристаллизации деформированного материала плоскостей скольжения возник агрегат зерен, обладающий отчетливой гранобластовой структурой. Морфологические особенности структуры позволяют считать ее равновесной. Пространственная ориентировка индивидов совершенна: все индивиды структуры ориентированы статистически закономерно не только оптическими осями, но и всеми основными кристаллографическими формами (данные дифрактометрического изучения) относительно микроструктурных осей a , b , c (плоскости зеркал скольжения).

Оставляя в стороне дискуссионные вопросы о генезисе плоскостей скольжения [24 и др.] и придерживаясь представления о связи явления с вязким разрушением, рассмотрим полученные результаты с позиций формирования рекристаллизационных структур.

Совершенная оптическая ориентировка рекристаллизованного материала позволяет принять представление о том, что рекристаллизацию претерпел только более интенсивно пластически деформированный мономинеральный кварцевый материал плоскостей скольжения. Перекристаллизация происходила в условиях ориентированного давления. Судя по диаграммам ориентировки кварца материала, вмещающего зеркала скольжения, ориентирован-

ное давление прилагалось перпендикулярно плоскости зеркал скольжения (параллельно микроструктурной оси c).

Совершенная оптическая ориентировка зерен кварца зеркал скольжения позволяет считать, что направление действующего усилия, вызвавшего появление зеркал скольжения, не изменялось и при рекристаллизации. В противном случае, судя по данным проведенных опытов (фиг. 42), мы не наблюдали бы столь совершенной, стабильной для данной схемы воздействия внешних сил ориентировки кристаллических решеток зерен кварца гранобластовой структуры, обусловленной собирательной рекристаллизацией.

В целом полученные результаты достаточно хорошо совпадают с приведенными ранее экспериментальными данными по рекристаллизации пластически деформированного кварцевого материала в условиях ориентированного давления, подтверждая представление автора о том, что анизотропия упругих свойств отдельного индивида — ведущий фактор и в развитии явления рекристаллизации.

Особенности вторичного роста зерен кварца в твердом агрегате

Вторичный рост зерен в твердом агрегате широко наблюдается в горных породах, различных по генезису, возрасту и составу. Явление выражается в том, что в породе, структурные признаки которой связаны с кристаллизацией из расплава, литификацией, перекристаллизацией при метаморфических преобразованиях или рекристаллизацией деформированных пород, наблюдается последующее укрупнение зерен, обусловленное миграцией их границ (возможность перекристаллизации горных пород в твердом состоянии была показана Ф.Ю. Левинсоном-Лессингом еще в 1911 г.).

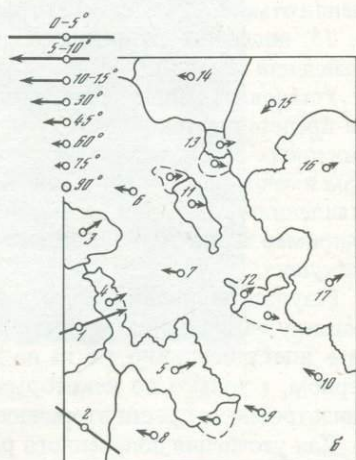
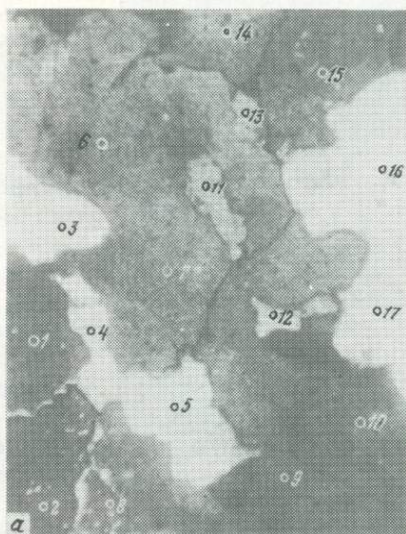
Отличительная особенность процесса: пропорциональное увеличение размеров одних зерен и уменьшение других строго координировано, поскольку процесс идет без изменения объема материала. Явление называется различно: перекристаллизацией с укрупнением зерен, ускоренным ростом зерен, собирательной рекристаллизацией, огрублением структуры, бластезом, вторичным ростом зерен.

Разработка новых, тонких физических методов исследования, большой объем экспериментальных работ привели к определенным успехам в познании отдельных сторон физики роста зерен в твердом агрегате [11, 67].

Дислокационные, диффузионные и вакансионные модели помогают независимо от истинного механизма более углубленно представить природу явления, но еще не в состоянии дать стройного представления о природе вторичного роста зерен в твердом агрегате [15, 77]. Изучение вторичного роста зерен в твердом агрегате на примере геологических объектов практически только начинается и сводится в основном к скромному использованию общих представлений, распространенных в металлофизике и физическом материаловедении.

В данном разделе работы рассматривается, с качественной стороны, возможная природа вторичного роста зерен в твердом агрегате и роль анизотропии упругих свойств растущего зерна в этом процессе [41].

Гранобластовые структуры, обладающие элементами вторичного роста зерен, были встречены нами в широком диапазоне геологических условий:



Ф и г. 46. Кварцевый материал архейских кварц-диопсидовых пород Юго-Западного Прибайкалья

Пример роста одного зерна кварца за счет другого (а) и структурная карточка участка (б). Увел. 40, николи скрещены

Цифры — порядковые номера замеров. Стрелки показывают ориентировку оптических осей. На врезке (б) — масштаб наклона оптических осей к плоскости шлифа

от кварцитовидных песчаников и кварцевого материала архейских кварц-диопсидовых пород Юго-Западного Прибайкалья до кварцевого материала жил золоторудных, полиметаллических месторождений и вторичных кварцитов.

Проведенное изучение показало, что выявить особенности вторичного роста зерен на примерах равновесных гранобластовых структур трудно, так как зерна структуры уже равновесны. Более обнадеживающими представляются примеры, в которых развитие структур, обусловленных вторичным ростом зерен, не дошло до своего логического конца. В этом случае по характеру границ между соседними зернами, содержащими элементы замещения, а также по реликтам замещенных зерен в зернах замещающих можно достаточно обоснованно судить об особенностях роста зерен в твердом агрегате.

В качестве примера рассмотрим агрегат зерен кварца. На фиг. 46, а видно "основное" замещающее (растущее) зерно (точки 6-10), окружающие его зерна (1, 2, 14, 15, 16-17) и реликтовые участки замещенного зерна (4-5, 11, 12, 13), отчетливо различимые в основном зерне благодаря одновременному их угасанию при повороте столика микроскопа.

Проведенное изучение показывает, что элементы замещения "основным" зерном зерен соседних отмечается не на всех участках контакта; судя по характеру границ, в зоне контакта "основного" зерна с зернами 1, 2, 14, 15 элементы замещения отсутствуют. Рост основного зерна идет преимущественно за счет зерен 3, 4-5 и 16-17; наличие реликтов в основном зерне под-

тверждается это представление. Элементы замещения в данном случае отчетливы — границы указанных зерен в контакте с основным зерном изогнуты, как бы изъедены, несколько растушеваны. Для зерна 15 элементы замещения отмечаются только на границе с зерном 16; судя по реликтам в зерне 15, последнее развивалось путем миграции межзеренной границы в направлении зерна 16.

Установить направление миграции границ зерен по их форме однозначно не представляется возможным. Сказанное относится и к форме границ реликтовых зерен, находящихся внутри основного зерна. Хотя они в основном имеют форму выпуклую, характерную, согласно существующим представлениям [103], для зерен исчезающих, тем не менее отдельные реликты, например зерно 12, могут иметь контуры вогнутые, характерные для зерен растущих.

Результаты проведенного изучения дают основную морфологическую картину рассматриваемого явления: вторичный рост зерен в твердом агрегате идет селективно, т.е. не по всем зернам, контактирующим с растущим зерном, а только по некоторым, что позволяет говорить об определенной анизотропии скорости вторичного роста индивида в агрегате.

Для уточнения полученного результата было проведено изучение оптической ориентировки пар зерен с элементами замещения в зоне их контакта. Выявлено главное: отчетливое замещение одного зерна кварца другим в рассматриваемом случае возможно лишь при резко различной оптической ориентировке контактирующих зерен.

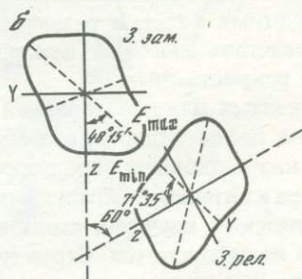
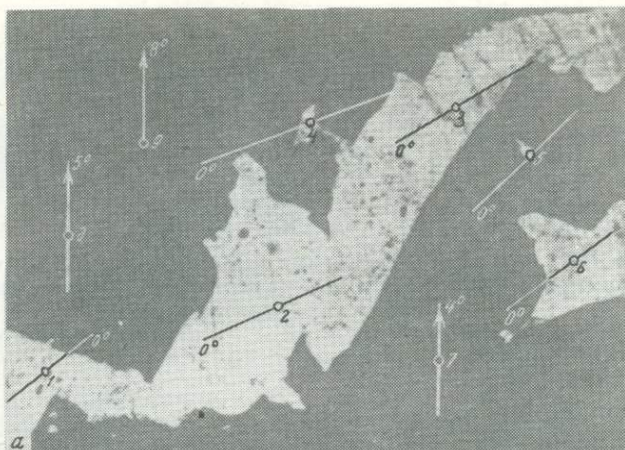
Изучением угловых соотношений между оптическими осями пар зерен с элементами замещения в зоне их контакта, выполненным на основе стереографической сетки Вульфа, выявлено, что угол между оптическими осями в данном случае закономерен и колебался в пределах $50-70^\circ$; в среднем он равен 60° .

Проверка полученных результатов на парах зерен, оптические оси которых лежат в плоскости шлифа, показала, что угол между оптическими осями реликтовых зерен (фиг. 47, а, точки 1-4, б) и зерен замещающих (5, 7-9) равнялся $\sim 60^\circ$.

Уточняя причины, предопределяющие появление элементов замещения (вторичного роста) только между отдельными контактирующими зернами, рассмотрим взаимоотношения указанных зерен с позиции основного свойства кристаллической структуры минерала — его упругих свойств (на примере зерен фиг. 47, а). Для этой цели одно из трех сечений $z\gamma$ указательной поверхности модуля Юнга низкотемпературного кварца ориентировалось согласно установленному положению оптических осей в выбранных для исследования зернах кварца; построение выполнено для правого кварца.

Полученная схема ориентировки упругих констант контактирующих зерен кварца (б) позволяет считать, что избирательное замещение одного зерна другим в случае вторичного роста в твердом агрегате, как и в случае формирования межзеренных структур растворения под давлением, наиболее полно проявляется лишь тогда, когда в контактирующих зернах направления кристаллической структуры индивидов, характеризующиеся минимальным и максимальным значениями модуля Юнга, взаимно параллельны.

Представление о равновесной ориентировке кварца в поле внешних сил — принцип наибольшего запаса упругой энергии [119, 145] — и резуль-



Ф и г. 47. Кварцевая галька плийсбахских песчаников, Северный Кавказ

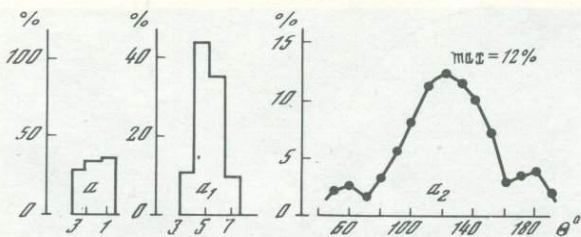
a — рост одного зерна кварца (темное поле — зерно замещающее — *з. зам.*) за счет другого (светлое поле, зерно реликтовое — *з. рел.*) и схема взаимной ориентировки сечений *zy* указательной поверхности модуля Юнга низкотемпературного кварца (*б*). Увел. 80, николи скрещены. Цифры у оптических осей — углы их наклона относительно плоскости шлифа. См. подпись к фиг. 46

таты проведенного исследования (*б*) позволяют считать, что зерна замещающие находились в более напряженном состоянии, чем зерна растущие.

Полученные результаты достаточно определенно указывают, что первопричина развития явления связана с анизотропией упругих напряжений, обусловленных анизотропией упругих свойств контактирующих индивидов.

Рекристаллизационные структуры кварцевого материала кварц-диопсидовых пород Юго-Западного Прибайкалья

В данном разделе на примере изучения отдельных образцов рекристаллизованного кварцита уточняется общераспространенное представление о достаточно однородной оптической ориентировке кварцосодержащих метаморфизованных пород. Рассматривается метаморфизованный кварцевый материал, структурные особенности которого предопределены рекристаллизацией.



Ф и г. 48. Кварцит кварц-диопсидовых пород. Характеристика гранобластовых структур, обусловленных рекристаллизацией, на основании результатов изучения морфологических признаков

a — гистограммы кривизны границ зерен; a_1 — гистограммы форм зерен, наблюдаемых в шлифах; a_2 — кривые распределения двугранных углов

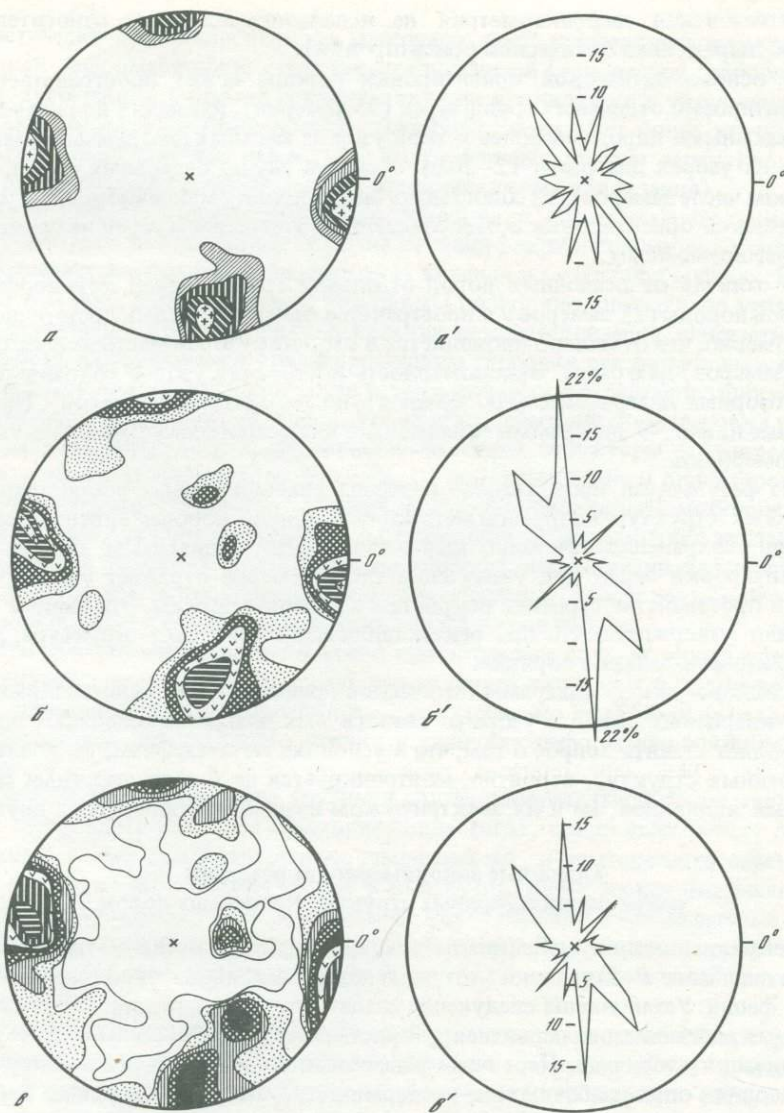
Изучались образцы кварцевого материала кварц-диопсидовых пород; их общее описание было приведено выше. Напомним, что генезис кварц-диопсидовых пород связывается с региональным метаморфизмом первично-слоистых кварц-карбонатных толщ, с развитием в указанных толщах структур будинажа (вследствие высокой пластичности кварцевых пропластков) и последующей рекристаллизации.

Текстурные признаки взятых для исследования образцов указывали на интенсивную пластическую деформацию кварцевого материала (как уже отмечалось, полосчатость кварц-диопсидовых пород — следствие будинирования пропластков мрамора в интенсивно пластически деформируемом кварците). Но при петрографическом изучении столь интенсивно проявленная пластическая деформация не наблюдается. Структура породы гранобластовая. Ее можно характеризовать как мостовую, в ряде случаев — как переходную от мостовой к зубчатой. Сопоставление макроскопических признаков с микроскопическими позволяет утверждать, что рассматриваемые образцы обладают метаморфогенной рекристаллизационной структурой (указанная структура результат собирательной рекристаллизации).

Зерна кварца, слагающие рассматриваемые образцы, имеют различные размеры (преимущественно 0,5–2 мм); в пределах отдельных образцов наблюдается более узкая размерность зерен.

Зерна кварца взятых для исследования образцов несут следы определенного тектонического воздействия: облачное, полосчатое угасание, элементы микродеформационных структур. В качестве примера рассмотрим образец кварцевого материала кварц-диопсидовых пород из района г. Слюдянки. Гранобластовая структура образца характеризовалась размерами зерен 0,2–0,6 мм. Проведенное изучение морфологических признаков показало определенное развитие элементов пластической деформации, что обусловлено более поздним тектоническим воздействием. На развитие отмеченного процесса указывают (фиг. 48): криволинейные границы зерен, преобладающее развитие четырех- и пятиугольных форм, кривая распределения двугранных углов, имеющая небольшой максимум при 120° (12%), и два дополнительных максимума (при 60° и 180°).

Проведенное изучение распределения углов между удлинением и оптической осью зерна отчетливо показало ($\chi^2 = 16,44$), что этот угол, как и в случае развития зеркал скольжения (фиг. 44), равен 45° . Наличие небольшо-



Ф и г. 49. Кварцит кварц-диопсидовых пород

Местные (*a, a'*), частные (*b, b'*) и обзорные (*v, v'*) диаграммы ориентировки зерен кварца; *a-v* — диаграммы оптической ориентировки зерен (изолинии: 1-2-3-4 > %; максимум местных диаграмм — до 20%); *a'-v'* — диаграммы ориентировки зерен по удлинению

го дополнительного максимума в интервале 10–20° достаточно определено свидетельствует о пластической деформации, развивающейся по исходной гранобластовой структуре.

Изучение ориентированного строения материала показало, что его основные закономерности близки к установленным ранее для осадочных пород

(рентгеновская дифрактометрия не использовалась из-за относительно слабо выраженной оптической ориентировки).

В основе оптической ориентировки породы лежит пространственная ориентировка отдельных групп зерен (25 замеров), имеющих по сравнению с осадочными породами более четкий узор на местных диаграммах (максимум на узорах диаграмм 12–20%). Как и в случае осадочных пород, при данном числе замеров (25) сопоставить ориентировку максимумов диаграмм оптической ориентировки с преобладающим удлинением зерен не представлялось возможным.

В отличие от осадочных пород отдельные группы зерен метаморфизованной породы (25 замеров) в пространстве ориентировались достаточно закономерно, что отчетливо проявляется в сходстве узоров местных и частных (50 замеров) диаграмм. Закономерность построения узоров сохраняется и на обзорных диаграммах (100 замеров), и на общих (200 замеров). Приведенные на фиг. 49 диаграммы убедительно иллюстрируют установленную закономерность.

Из результатов проведенного изучения гранобластовых рекристаллизационных структур кварцевой метаморфизованной породы можно сделать вывод: сохранение отчетливо выраженного узора диаграмм оптической ориентировки зерен при увеличении числа замеров отражает упорядоченное в пространстве строение рекристаллизованной породы. Эти данные позволяют утверждать, что при рекристаллизации возникает структура, упорядоченная в дальнем порядке.

Сходство узоров диаграмм оптической ориентировки рекристаллизованных кварцевых пород с узорами аналогичных диаграмм осадочных пород позволяет ставить вопрос о том, что в условиях метаморфизма становление указанных структур, вероятно, контролируется не только упругими свойствами индивидов, но и их электрическом взаимодействии друг с другом.

Основные закономерности развития рекристаллизационных структур кварцевых пород

Рекристаллизация существенно кварцевых пород наблюдается в широком диапазоне P – T условий — от эпигенеза до амфиболитовой и гранулитовой фаций. Установлены следующие стадии развития явления: полигонизация, рекристаллизация первичная, рекристаллизация собирательная и рекристаллизация вторичная. Первичная рекристаллизация кварцевого материала в условиях опыта наблюдалась при термической активации и только в условиях всестороннего сжатия (при атмосферном давлении наблюдался лишь первый этап развития явления — полигонизация, фиг. 28).

Результаты проведенного изучения показали возможность существования первичной рекристаллизации постдеформационной (статической) и рекристаллизации синтетектонической (динамической). Последняя возникает в тех же P – T условиях, что и пластическая деформация, и является ее логическим продолжением в условиях резко ограниченной физической возможности породы деформироваться пластически.

В основе первичной рекристаллизации независимо от того, рассматривается ли постдеформационная или синтетектоническая рекристаллизация, лежат возникновение и рост агрегата равновеликих зерен за счет исходного

пластически деформированного материала, рост, приводящий к смене исходной деформационной структуры структурной равновесной гранобластовой. Дальнейшее развитие рекристаллизации проявляется в укрупнении отдельных зерен новообразованной структуры; возникает более крупнозернистая гранобластовая структура, обусловленная ростом зерен кварца в твердом агрегате (собирательная и вторичная рекристаллизация).

Приведенные данные однозначно показывают, что в материале с ионно-ковалентным типом связей развитие явления рекристаллизации в принципе не отличается от развития аналогичных явлений в металлах и сплавах. Вместе с тем полученные автором результаты позволяют значительно углубить существующие представления о явлении рекристаллизации, показать особенности формирования ориентированного строения рекристаллизованных агрегатов и закономерности роста зерен в процессе рекристаллизации. В ходе исследования было выявлено, что пространственная ориентировка индивидов новообразованной рекристаллизационной структуры предопределяется взаимодействием двух факторов — пространственной ориентировкой зерен исходной структуры и направлением внешней силы, контролирующей развитие рекристаллизации. В зависимости от соотношения указанных факторов в условиях опыта новообразованная рекристаллизовавшаяся порода могла иметь пространственную ориентировку, унаследованную от исходной породы и ориентировку, с последней не связанную.

При совершенной унаследованной ориентировке во всех зернах новообразованного агрегата параллельно действующей силе, как и при деформации, ориентируются направления E_{min} α -кварца, что указывает на сходство ориентировки действующего усилия в условиях деформации и кристаллизации.

Замещение одного зерна другим в случае собирательной рекристаллизации происходит наиболее отчетливо лишь тогда, когда угол между оптическими осями контактирующих замещающего и замещаемого зерен равен примерно 60° . В этом случае в контактирующих зернах оказываются взаимно параллельно расположенными максимальные и минимальные значения модуля Юнга низкотемпературного кварца. Рост менее напряженного зерна происходит в направлении E_{min} , т.е. под углом $\sim 45^\circ$ к оптической оси.

Полученные данные показывают, что развитие такого многофакторного процесса, как рекристаллизация, отчетливо коррелируются с анизотропией упругих свойств индивидов. Это позволяет принять следующее. Развитие процесса рекристаллизации — возвращение породы в стационарное (в пределе равновесное) состояние при выходе из него в результате изменения параметров среды или внешнего воздействия — предопределяется закономерным изменением упругой энергии индивидов в сторону устойчивого состояния. Изменение энергии обусловлено согласованной пространственной переориентировкой индивидов агрегата и контролируется реакцией упругих свойств зерен породы на внешнее воздействие (механизм явления — диффузионный).

Изложенное позволяет принять представление о том, что внутренняя реакция материала на внешнее воздействие, контролируемая анизотропией его упругих свойств, является и в случае рекристаллизации основным структурообразующим фактором.

Основываясь на полученных результатах, можно представить следующую схематическую картину физики явления рекристаллизации.

В новых, изменившихся условиях пластически деформированные породы оказываются в неравновесном состоянии. Причина явления — избыток упругой энергии в контактирующих зернах агрегата. В данном случае речь идет не столько о энергии упругих напряжений исходного пластически деформированного материала, сколько — и это новое — об упругих напряжениях, возникающих в индивидах деформированного материала в новых, изменившихся условиях, о "наведенных" внешним воздействием упругих напряжениях.

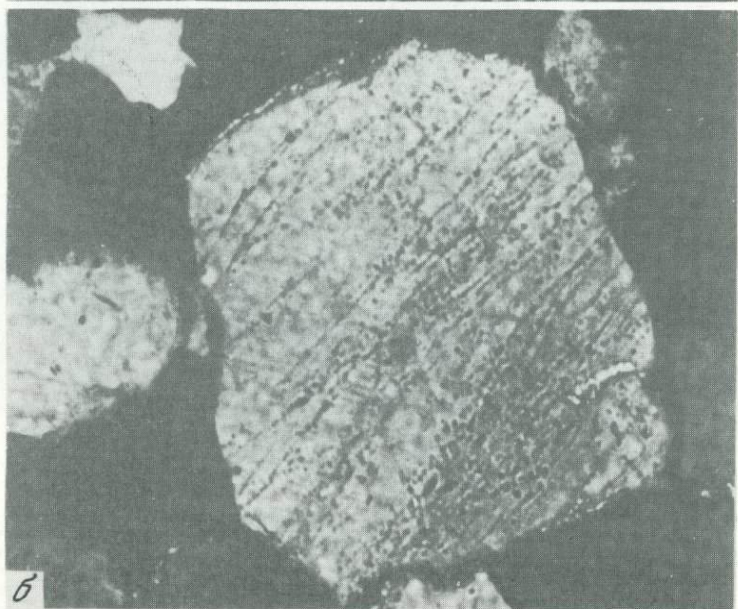
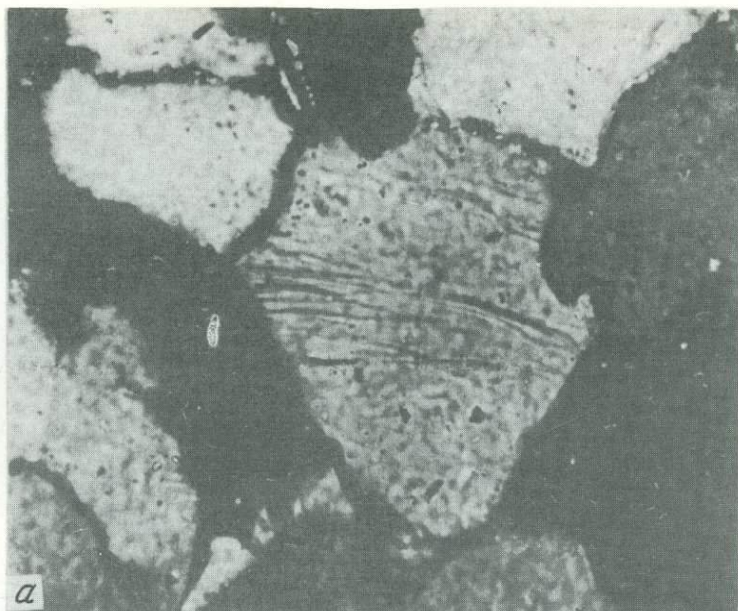
В случае первичной рекристаллизации в новых, изменившихся условиях в наиболее деформированных участках зерен пластически деформированного материала, а также в зонах контакта указанных зерен возникают субмикроскопические области, характеризующиеся минимальной энергией упругих напряжений для данных условий, — образуются зародыши новых зерен кварца.

Широко распространенное положение о том, что эти новообразованные участки (с минимальным количеством точечных и линейных дефектов) свободны от напряжения [90 и др.], одностронне отражает природу явления. Как и всякий упруго-анизотропный материал в поле внешних сил, новообразованные участки также будут находиться в сложном напряженном состоянии, но энергия упругих напряжений таких субмикроскопических областей меньше упругой энергии деформированных зерен в условиях рекристаллизации.

В ходе дальнейшего развития процесса предпочтительное развитие получают лишь те области (зародыши), пространственное положение которых равновесно для конкретных условий. Развитие таких закономерно ориентированных зародышей анизотропно, поскольку их рост, как уже указывалось, контролируется анизотропией их упругих свойств. Анизотропный рост зародышей приводит к формированию стабильного (в пределе равновесного) для данных условий агрегата зерна кварца.

Нетрудно видеть, что в случае рекристаллизации в основе механизма лежит анизотропная диффузия — однонаправленное поатомное (поионное) перемещение материала через границу зерен в сторону уменьшения градиента упругих напряжений. Но широко распространенное в литературе представление о том, что возникающие в напряженном теле диффузионные процессы направлены к выравниванию напряженного состояния в контактирующих зернах, отражает лишь внешнюю сторону явления. Истинный смысл явления видится в другом: закономерная переориентировка новообразованных при рекристаллизации индивидов — основной путь уменьшения наведенных внешним воздействием упругих напряжений в исходной пластически деформированной породе. При таком подходе наличие в кристаллических решетках индивидов нарушений и дефектов, обусловленных пластической деформацией, лишь облегчает развитие явления, но это не ведущий фактор.

С переходом деформированного материала в равновесное для данных условий состояние завершается первичная рекристаллизация и начинается следующая ступень явления — рекристаллизация собирательная. В основе ее также лежит изменение упругой энергии индивидов гранобластовой струк-



Т а б л и ц а I. Шокшинский кварцитовидный песчаник

Структурные особенности породы характеризуются наличием межзеренных структур растворения под давлением, внутризеренными деформационными полосками (а) и полосками Бёма (б). Увел. 150, николи скрещены

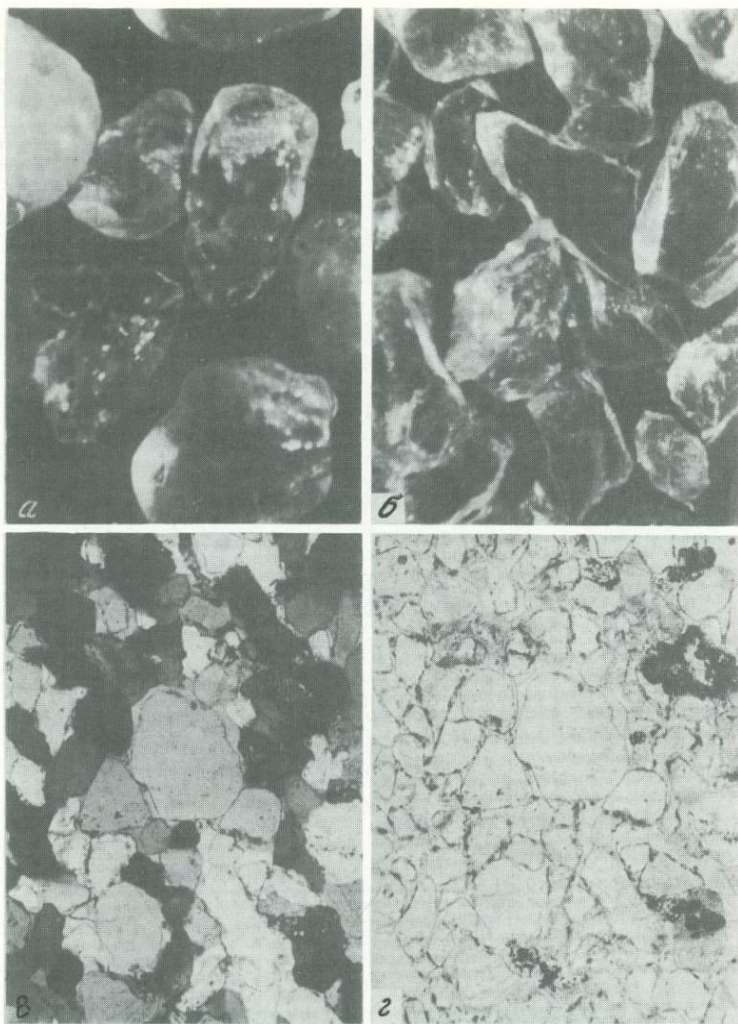


Таблица II. Агрегат зерен кварца природного песка (а), увел. 80, и агрегат зерен мелкодробленого кварца (б), увел. 80

Толкачевский кварцитовидный песчаник (в и г) образцов породы с преобладающим развитием межзеренных регенерационных структур в шлифе под микроскопом. В породе наблюдаются реликтовые обломочные зерна кварца, отчетливо заметные благодаря темной тонкой оторочке окислов железа; в — с анализатором, г — без анализатора; увел. 150

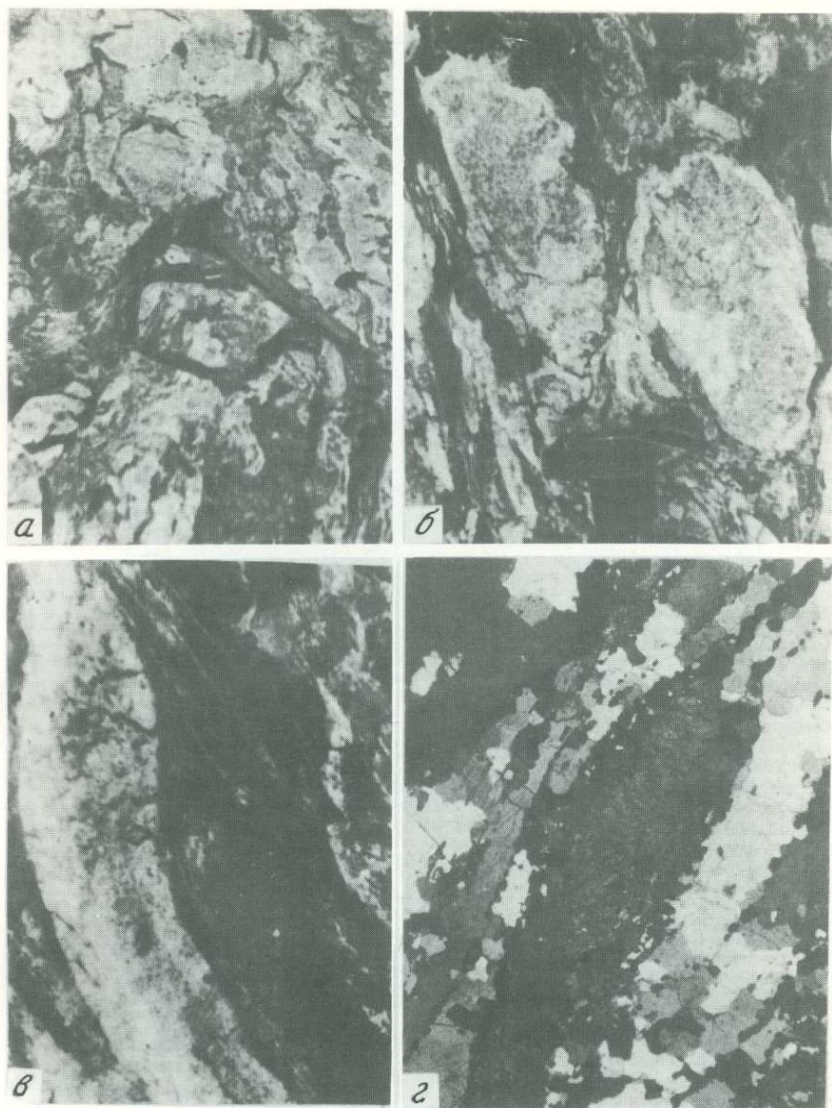


Таблица III. Структуры будинажа в кварц-диопсидовых породах (Юго-Западное Прибайкалье)

Тектурные признаки кварц-диопсидовых пород (белое — мрамор, диопсид, темное — кварцит) наблюдаемые: *а* — в обнажении, *б* — на участках обнажения, *в* — в отдельных образцах, подтверждают весьма интенсивную пластическую деформацию кварцита и хрупкое поведение мрамора; *г* — в шлифах под микроскопом кварцит признаков пластической деформации обычно не имеет, они "стерты" более поздним процессом — рекристаллизацией; на проходившую пластическую деформацию указывают характерное расположение линзовидных скоплений диопсида и изгибающиеся полосы темных точечных включений апатита. Увел. 46, николи скрещены



Таблица IV. Структуры будинажа в кварцит-пиррофиллитовой толще (овручская серия, УССР)

а — зона пережима пиррофиллитового пласта; по поведению пиррофиллитового материала отчетливо выявляется тектонический характер пережима (*ЛФ* — пиррофиллит, *Кв* — кварцит); *б* — "валы" кварцитово́й кровли, наглядно фиксирующие пережим мощности пиррофиллитового сланца, прослеживаются по всему выработанному пространству



Т а б л и ц а V. Рекристаллизация природного пластически деформированного кварцита в условиях опыта

а — исходный пластически деформированный кварцит, увел. 70, николи скрещены; *б* — длительность опыта 3 часа; по границам исходных деформированных зерен и внутри последних наблюдается развитие новообразованных зерен; увел. 70, николи скрещены; *в* — продолжительность опыта 5 час.; агрегат новообразованных зерен практически полностью замещает исходный деформированный материал; увел. 150, в поляризованном свете

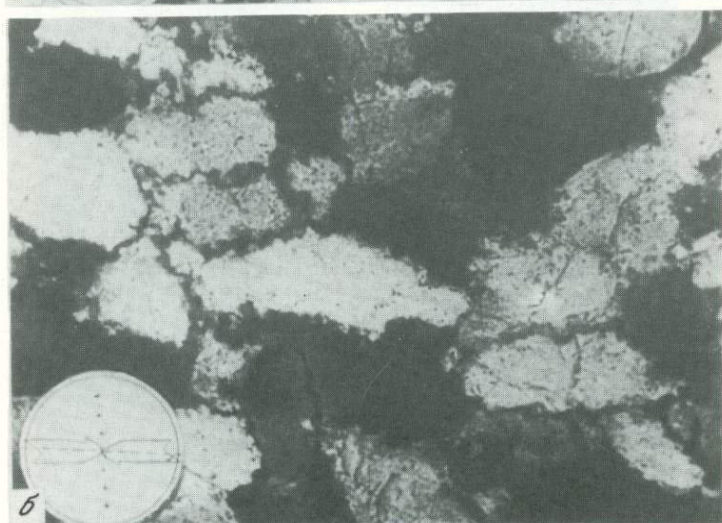
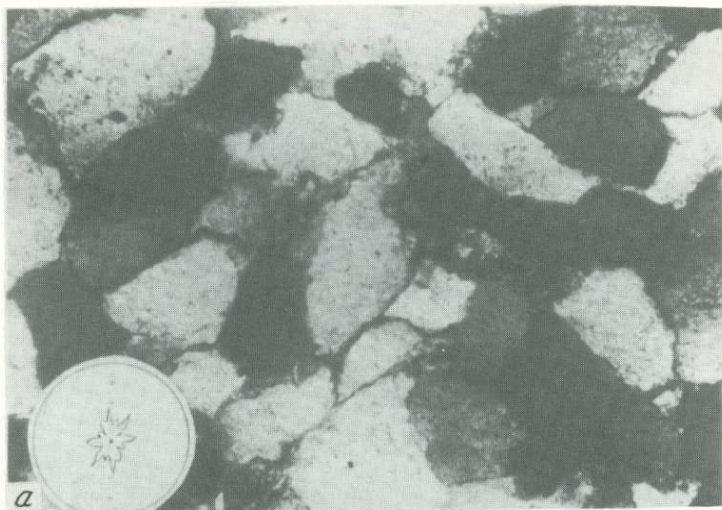


Таблица VI. Пластическая деформация природного кварцитовидного песчаника в условиях опыта

a — исходный кварцитовидный песчаник; *б* — деформационная структура, наблюдаемая в кварците после опыта; увел. 70, николи скрещены. Круговые диаграммы показывают ориентировку длинных осей зерен кварца

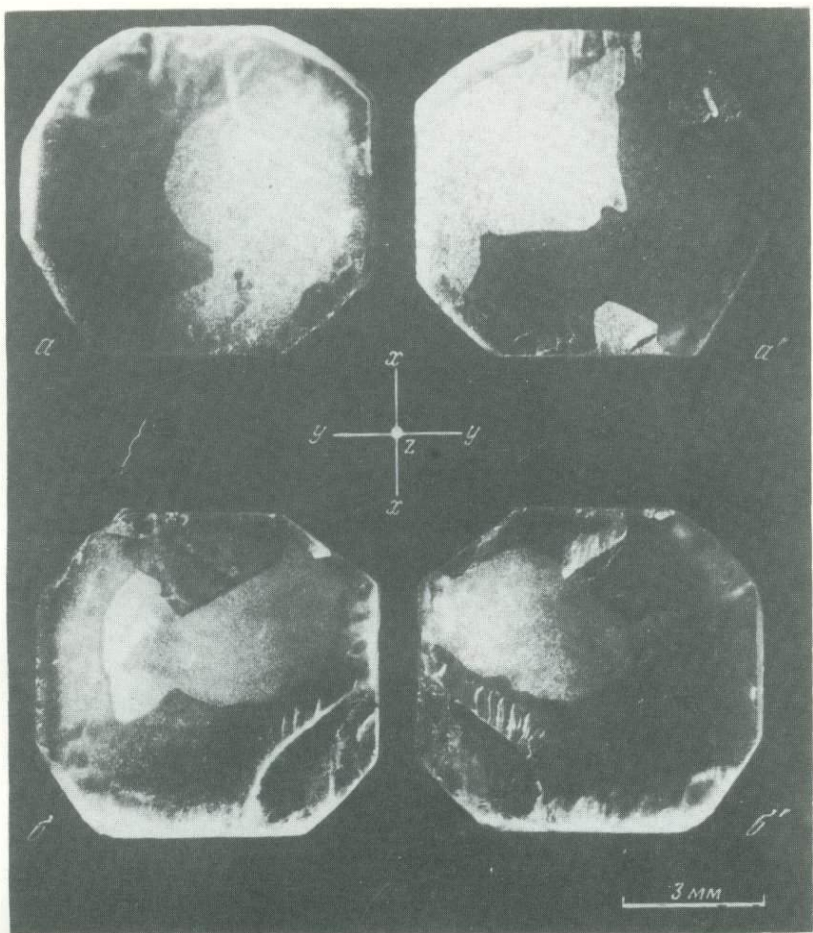


Таблица VII. Фигуры механического двойникования кварца на взаимно параллельных поверхностях пластинчатых фрагментов

a и *a'* — пластинка кварца из торцовой части образца (из менее деформированного участка), *б* и *б'* — пластинка кварца из центральной (наиболее деформированной) части образца

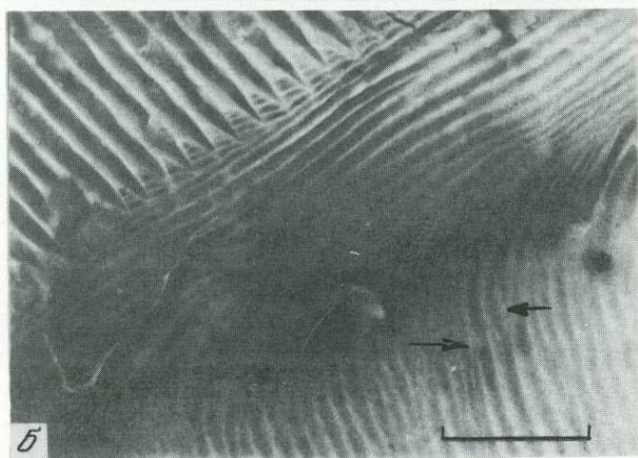


Таблица VIII. Результаты электронно-микроскопического изучения деформированного кварца — образец 3. Поверхности отрыва не протравлены. Одноступенчатые угольные реплики; масштаб соответствует одному микрону.
Пояснения в тексте

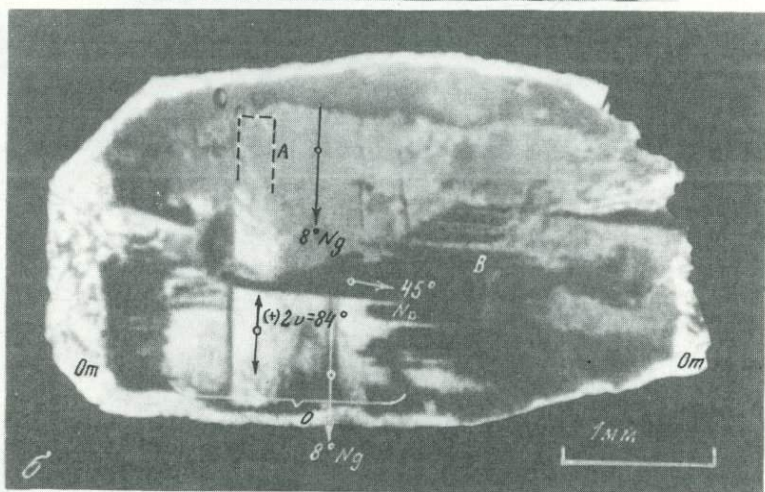
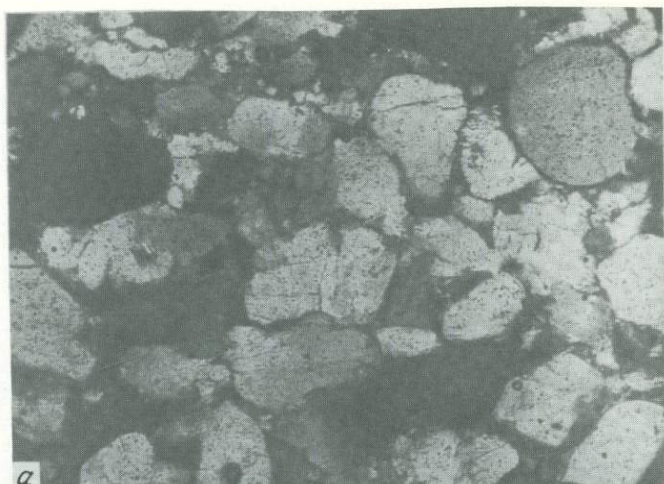


Таблица IX. Результаты электронно-микроскопического изучения образца 3 (а). Образец шлифован и затем протравлен в смеси азотной и плавиковой кислот.

Увел. 1000, одноступенчатая угольная реплика

Пластическая деформация кварца в условиях опыта (б). Шлиф образца кварца после опыта (сечение через центральную часть образца параллельно его оси, в поляризованном свете). Участок А — неизменный кварц; участок В — три вертикальные зоны с измененной ориентировкой; участок В — область проявления деформации, напоминающей двойникование. Линии со стрелками указывают направление ориентировки соответствующих осей оптической индикатрисы; стрелки показывают их воздымание, цифры — углы наклона. *Om* — оторочка плотных модификаций (стишовит-козсит). Пунктиром показано место взятия образца для рентгенографического изучения



а

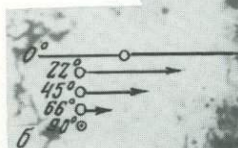
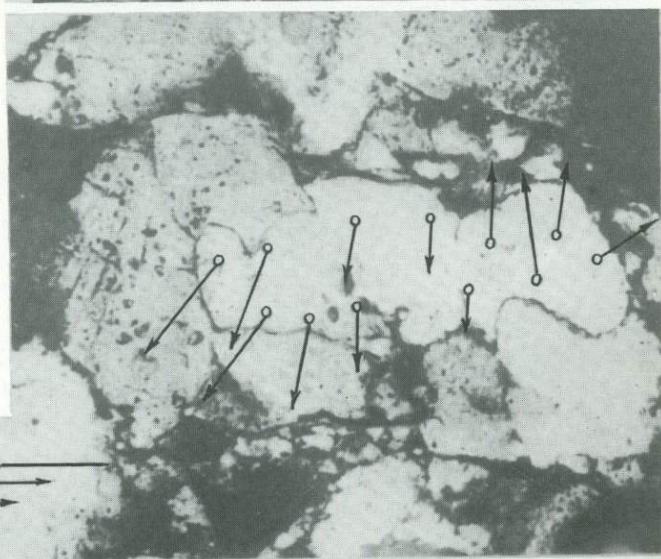


Таблица X. Искусственная порода типа песчаника (а). Увел. 46, николи скрещены
 Искусственная порода типа метаморфизованного кварцитопесчаника (зона де-
 формации; б). На структурной карточке отчетливо видно, что ориентировка зерен
 оптических осей кварца в деформированном зерне на разных участках различна.
 Масштаб наклона оптических осей к плоскости шлифа приведен в левой нижней части
 фигуры. Увел. 80, николи скрещены

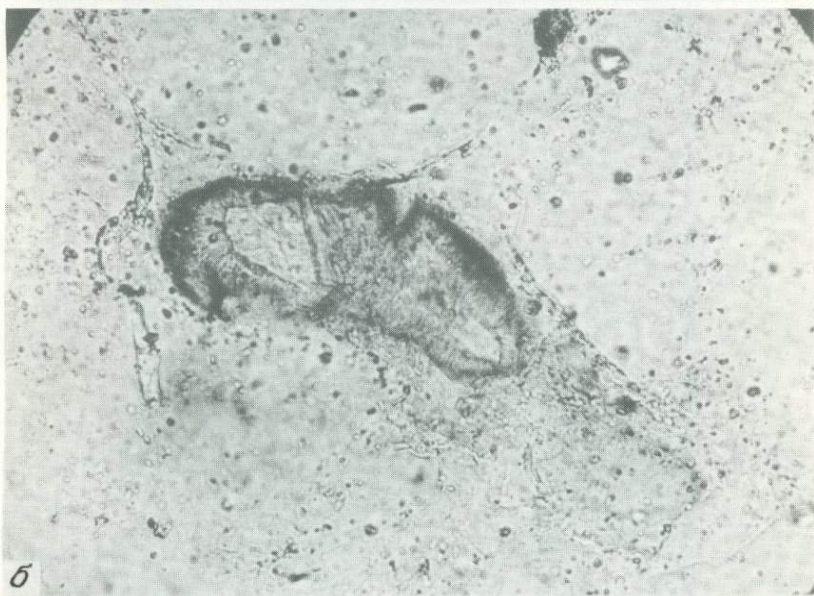
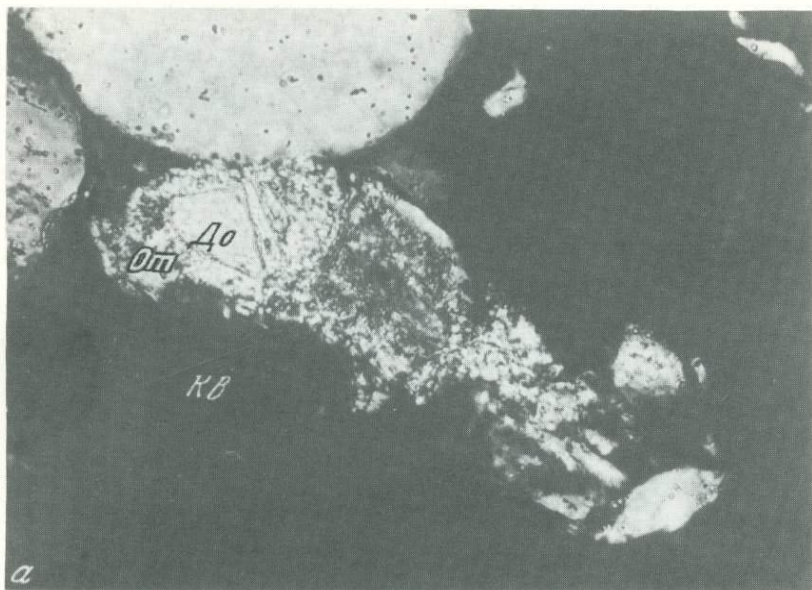


Таблица XI. Опыт моделирования биметасоматического процесса. Развитие реакционной тальк-кальцитовой оторочки (От) по контакту зерен доломита и кварца
а – без анализатора; *б* – увел. 270, николи скрещены

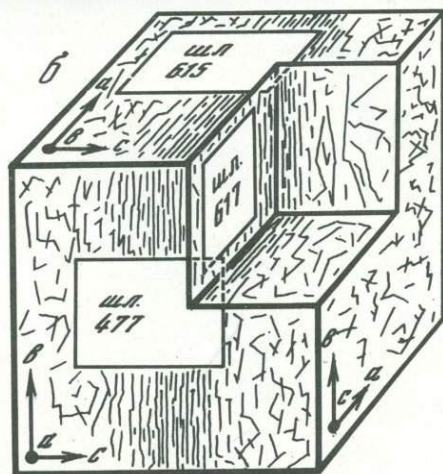
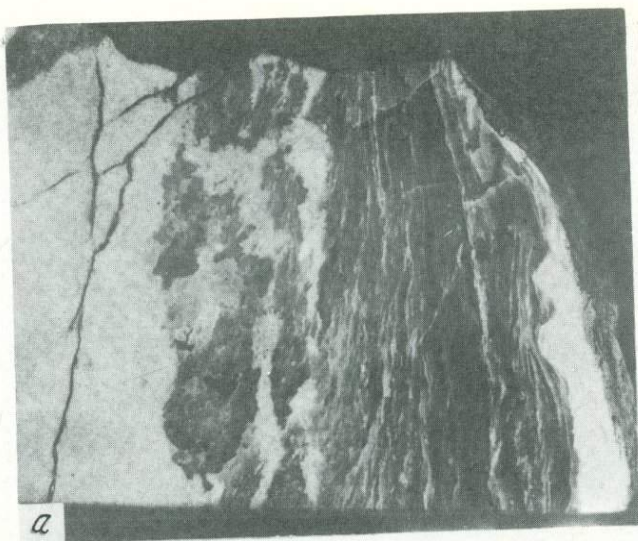


Таблица XII. Пример природной пластической деформации кварцита (Юго-Западное Прибайкалье)

a — зона интенсивной пластической деформации (мощностью 10–15 мм) макроскопически отчетливо выделяется на фоне серого кварцита более темным цветом, отсутствием обычной для кварцита зернистости; натур. велич. *б* — блок-диаграмма образца с зоной пластической деформации; показаны номера шлифов и места их взятия; *a-c* — микроструктурные оси; шлиф 477 характеризует сечение вертикальное, субширотное, шлиф 615 — субгоризонтальное, шлиф 617 (617А) — вертикальное, субмеридиональное



Т а б л и ц а XIII. Природная пластическая деформация кварцита, шлиф 477; увел. 6, николи скрещены

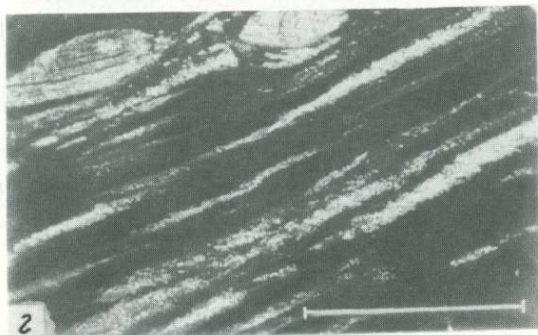
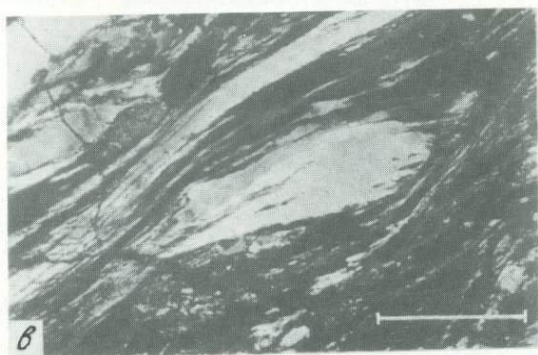
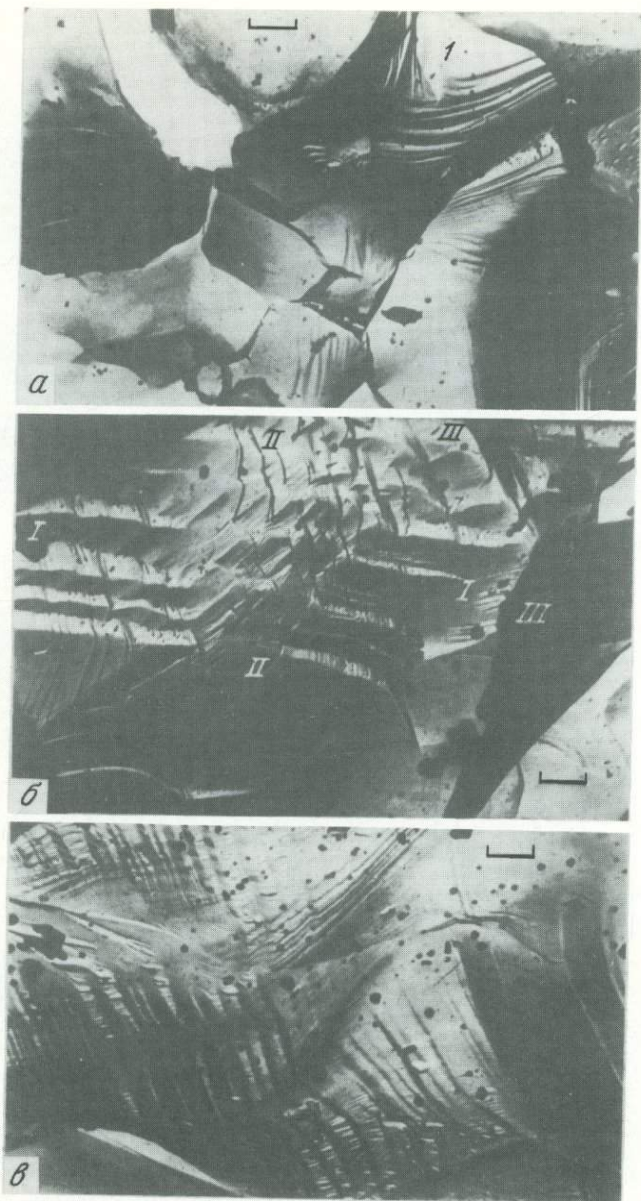
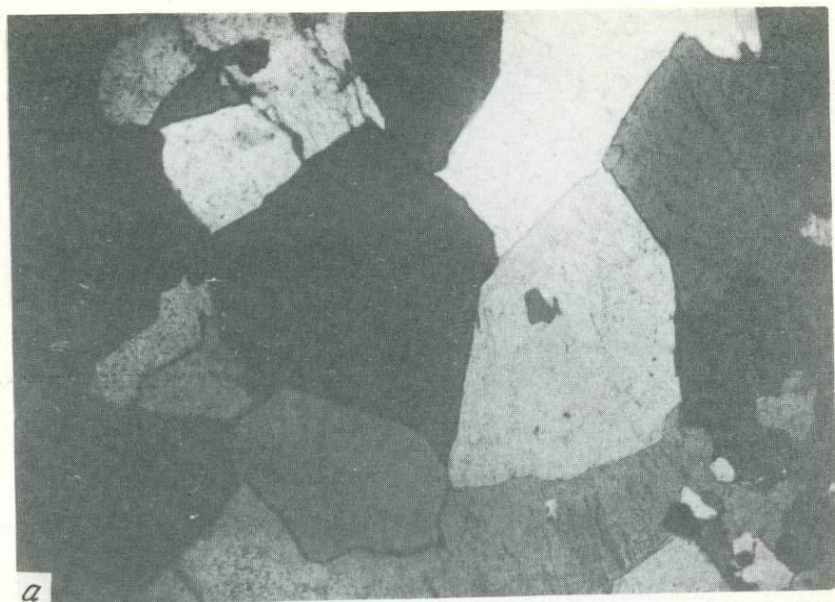


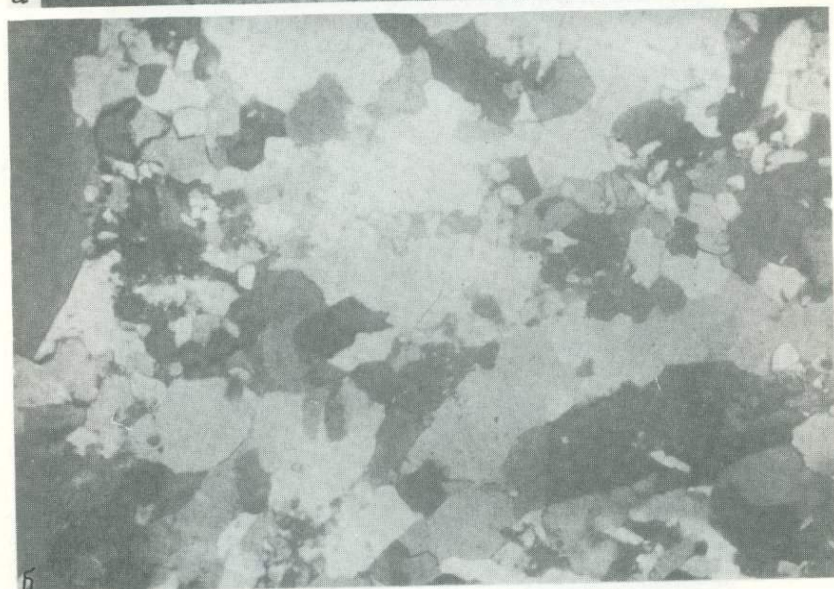
Таблица XIV. Природная пластическая деформация кварцита. Шлиф 447. Сечение вертикальное субширотное (пояснения в тексте)



Т а б л и ц а XV. Природная пластическая деформация кварцита, наблюдаемая в препаратах под электронным микроскопом; масштаб равен 1 μ



а



б

Таблица XVI. В шлифах под микроскопом в поляризованном свете отчетливо видно, что кварцевый материал прожилка с поверхностями скольжения элементов пластической деформации не содержит (а). Разнозернистая структура материала отчетливо указывает на последующую рекристаллизацию с укрупнением зерен (б).
Увел. 70, николи скрещены

туры агрегата в сторону устойчивого состояния. Можно отметить определенную аналогию в образовании рекристаллизационных структур метаморфогенных кварцевых пород с образованием межзеренных структур растворения под давлением, наблюдаемых в литифицированных осадочных породах (фиг. 33 и 34).

Различие P - T условий и исходного материала предопределяет различие механизмов становления стационарного состояния в изменяющихся условиях: в высокопористом агрегате песчаной породы кварцевый материал из зоны контакта напряженного зерна переходит в межзеренный флюид. В случае вторичного роста зерен в твердом агрегате кварцевый материал из напряженного зерна в зоне контакта диффундирует в зерно менее напряженное. Но в любом случае неравновесные для данных условий зерна "убираются", и структуру агрегата образуют зерна, ориентировка которых стабильна для данных условий.

В новых, изменившихся условиях существующая равновесная гранобластовая структура, обусловленная собирательной рекристаллизацией, вновь будет неустойчивой. В этом случае вновь будет происходить развитие одних зерен за счет других, неустойчивых в данных условиях; вновь будет формироваться стабильная для этих условий гранобластовая структура, обусловленная вторичной рекристаллизацией.

Установленная в изученных рекристаллизованных породах весьма четкая пространственная ориентировка индивидов позволяет говорить о том, что в процессе рекристаллизации, как и в случае пластической деформации, в породе возникает пространственная упорядоченность индивидов в дальнем порядке; последнее принципиально отличает структуры метаморфизованных кварцевых пород, обусловленные рекристаллизацией, от структур плотных осадочных пород, характеризующихся упорядоченностью в ближнем порядке.

Развитие закономерной ориентировки индивидов рекристаллизованной породы в любом из указанных случаев достаточно надежно фиксируется наличием пьезоэффекта в кварцевых метаморфизованных породах [16].

В целом результаты изучения процессов пластической деформации и рекристаллизации позволяют считать, что между указанными процессами различие касается лишь механизмов переориентировки зерен в стабильное для новых условий положение. В условиях метаморфизма становление стационарного состояния породы может быть обусловлено совместным проявлением обоих указанных процессов.

В целом актуальность установленных представлений о развитии пластической деформации и рекристаллизации поликристаллических тел предопределяется не столько собственно проблематикой, сколько возможностью теоретически аргументированных подходов к уточнению геологической сущности рассматриваемых явлений. Как пример укажем, что на основе полученных результатов появляется возможность более обоснованного и целенаправленного применения в геологии петроструктурного анализа, проведение петрофизических исследований и решение ряда практических задач структурной геологии и тектонофизики.

Сам факт начала познания процессов пластической деформации и рекристаллизации, по мнению автора, таит в себе огромные перспективы плодотворного использования этих процессов в науке и технике.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данном разделе вначале рассматривается систематика структурных признаков кварцевой породы, наблюдавшихся в условиях метаморфизма погружения, — простейшего типа регионального метаморфизма. По результатам систематики выводятся общие закономерности необратимых структурных изменений кварцевой породы в осадочном и метаморфическом циклах ее развития. На основе полученных результатов выясняется сущность формоизменения слагающих горную породу зерен кварца, а затем и структурных изменений горной породы.

Систематика структурных признаков

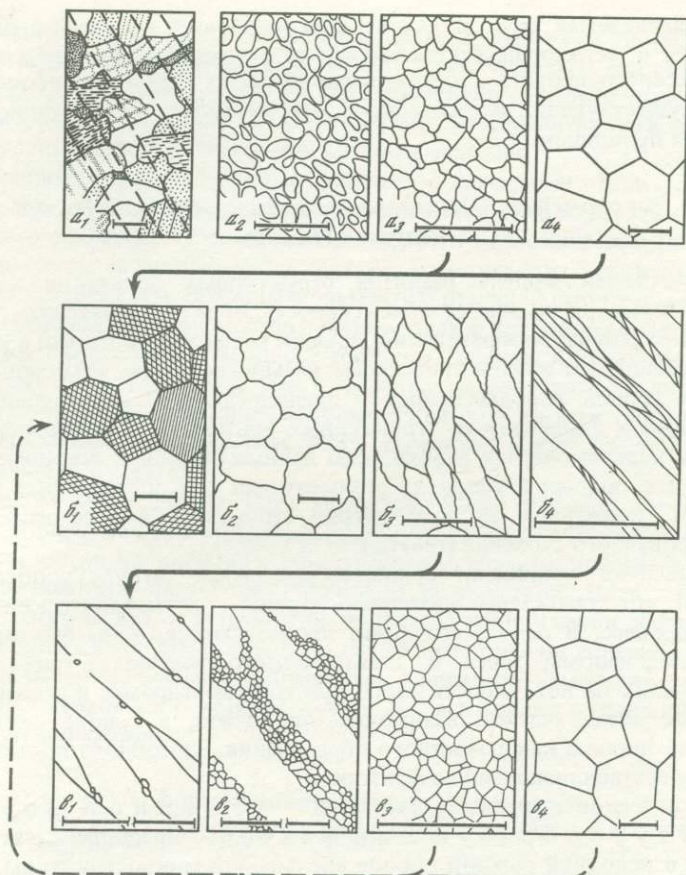
Располагая набором палеостатических моделей, характеризующих структурные особенности кварцевой породы в определенные фиксированные моменты ее развития в прошлом, можно выстроить указанные модели в ряд, в последовательности образования их во времени. Графическое изображение подобной генетической модели структурообразования кварцевой породы приведено на фиг. 50. Верхний ряд ($a_1 - a_4$) иллюстрирует отдельные этапы изменения структурных признаков в осадочном, средний ($b_1 - b_4$) и нижний ($v_1 - v_4$) — в метаморфическом циклах развития породы.

В процессе выветривания исходных кварцсодержащих пород образуется обломочный кварц (a_1). В результате его транспортировки в бассейнах седиментации формируются пески — высокопористые (до 50%) осадочные породы, способные противостоять внешним дестабилизирующим факторам.

Одновременно с накоплением возникает и характерная кластогенная структура осадка (a_2). Приспособление исходного осадка к увеличивающимся параметрам среды и внешнего воздействия выражается в закрытии исходной пористости и формировании породы с непосредственно сцепленными зернами и более высокими физико-механическими свойствами. В основе преобразований лежит изменение формы слагающих породу обломочных зерен — их пластическая деформация. Межзеренные структуры растворения под давлением и регенерации развиты локально и имеют подчиненное значение (a_3). Отмеченные изменения обуславливают смену исходной кластической структуры новообразованной гранобластовой структурой; укрупнение зерен новообразованной структуры (вторичная рекристаллизация) возможно (a_4).

При увеличении P - T параметров, стимулирующих увеличение пластичности породы (пластичность кварцита в условиях метаморфизма значительно превосходит пластичность таких материалов, как мрамор и пиррофиллитовый сланец) и диффузии вещества, под влиянием тектонических напряжений осадочные породы метаморфизуются. В этом случае прочность породы предопределяется прочностью сцепления между зернами, которое превосходит прочность самих зерен (плоскости излома идут не по границам зерен, а пересекают их).

В условиях метаморфизма структуры первично-осадочной породы сменяются метаморфогенными структурами — деформационными, а также гранобластовыми, обусловленными рекристаллизацией. Деформационные



Ф и г. 50. Схема изменения строения кварцевой породы в ходе ее геологического развития в осадочном и метаморфическом циклах (стрелками показан возможный эволюционный ход структурных преобразований)

a_1 — гипидиоморфнозернистая структура исходной гипотетической породы (пунктирные линии — условное обозначение разрушения породы в зоне выветривания); a_2 – a_4 — структуры осадочного и b_1 – b_4 — метаморфического циклов развития; b_1 – b_4 — структуры деформационные, v_1 – v_4 — рекристаллизационные

структуры возникают в результате пластической деформации горной породы под влиянием механических напряжений. Развитие деформационных структур от начальной (дислокационной) стадии (b_1), через формоизменение отдельных индивидов (b_2 , b_3) заканчивается однозначной ориентировкой вытянутых в одном направлении зерен агрегата (b_4). При рекристаллизации пластически деформированного материала (v_1 , v_2 , v_3) или при росте зерен в твердом агрегате (собирательная, вторичная рекристаллизация, v_4) возникает агрегат более или менее изометричных зерен, характеризуемых гранобластовой структурой.

Полученные результаты не показывают отчетливой зависимости совершенства ориентированного строения новообразованных метаморфогенных структур от P – T условий метаморфизма.

Рассматриваемая модель развития структурных признаков породы в осадочном и метаморфическом циклах ее развития позволяет в какой-то мере реконструировать геологические события далекого прошлого на основе существующих исторического, генетического и структурного регулятивных принципов.

Закономерности изменения пространственного строения кварцевой породы

Рассмотренная модель развития структурных признаков кварцевой породы, несмотря на всю ее объективность, не может объяснить главного в проблеме структурообразования: причин, вследствие которых в условиях увеличивающегося воздействия среды из многообразия возможных путей развития горной породы природой предопределялся лишь единый путь, отраженный в изменении ее структурных признаков. Для уточнения этих причин в первую очередь необходимы данные об общих закономерностях становления породы в условиях седиментации и ее последующих преобразованиях, отраженные не в геометрии структуры, а в ее особенностях ориентированного строения (генетическая модель).

Проведенное уточнение сущности проблемы структурообразования показало, что становление кварцевой породы — не механический, а физический процесс. В основе его лежит противоборство ряда факторов: сил гравитации, формы зерен и электрического взаимодействия зарядов, возникающих на поверхности зерен при транспортировке и седиментации. Указанное электрическое взаимодействие лежит в основе становления осадочной породы как целостного образования, способного противостоять внешним дестабилизирующим факторам.

Электрическое взаимодействие зерен — основной породоструктурообразующий фактор — предопределяет возникновение в исходной рыхлой породе трехмерной микроструктуры, в которой каждое из зерен окружено соседними зернами, ориентированными относительно друг друга определенным образом. Устойчивая оптическая ориентировка зерен наблюдается лишь в пределах 25–50 зерен (упорядоченность ближнего порядка), и указанный объем горной породы можно считать элементарным объемом, с помощью которого по образу и подобию кристаллической решетки монокристалла возможно представить пространственное строение горной породы [13 и др.].

Развитие породы в условиях метаморфизма приводит к пространственной регулярности и упорядоченному строению минерального агрегата. Последнее выражается в том, что отдельные группы зерен становятся закономерно ориентированными друг относительно друга в пространстве. При увеличении числа замеров до 500 узоры диаграмм ориентировки оптических осей сохраняются такими же, как и в случае диаграмм, построенных на основе 50–100 замеров.

Предельная ориентировка зерен в агрегате соответствует ориентировке типа "монокристалл" — S-тектонит. Это случай, когда все кристаллические решетки индивидов имеют однозначную пространственную ориентировку.

Осадочная порода, претерпевшая метаморфизм, обладает весьма совершенным ориентированным строением (упорядочение в дальнем порядке).

Однородность строения горных пород, вытекающая из их упорядоченности в пространственном строении, позволяет характеризовать метаморфизованную кварцевую породу любого массива вполне определенными физико-механическими свойствами, зависящими от ориентировки слагающих породу индивидов и, естественно, внешних условий.

По-видимому, немаловажное значение в изменении структурных признаков агрегата в условиях метаморфизма продолжает играть электрическое взаимодействие зерен. Несмотря на то, что рассмотрение данной проблемы выходит за рамки работы, следует отметить, что, согласно современным представлениям, основным элементом реальной структуры кристалла, ответственным за большинство гетерогенных и твердофазовых процессов, являются электрически активные точечные дефекты и их микро- и макроскопления [46]. Последнее, как и установленная генерация электромагнитного излучения и возникновение зарядов на поверхности трещин, показывает необходимость более глубокого изучения данного аспекта поведения минеральных агрегатов.

В целом наблюдаемая смена упорядоченности строения породы позволяет говорить, как это принято в подобных случаях в геологии, об эволюции (развитии во времени) структурных признаков породы в условиях увеличивающихся параметров внешнего воздействия. Идеи эволюции в данном случае, как и в биологии, в первом приближении ассоциируются с изменением внешних условий и увеличением степени совершенства организации объекта. Однако приведенные данные об изменении пространственной ориентировки породы также не вскрывают сущности явления структурообразования.

О формоизменении индивида в агрегате и структурообразовании агрегата

Используя генетическую модель развития структурных признаков породы в качестве основы и поместив во главу угла процессы, лежащие в основе их изменения, мы практически получаем новую модель — эволюционную модель структурообразования породы в изменяющихся внешних условиях. Располагая этой моделью и дополнив ее данными о изменении пространственного строения, попытаемся уточнить, какие же причины и факторы лежат в основе изменения структурных признаков породы на любой стадии развития породы и каковы общие законы рассматриваемого явления. С этой целью рассмотрим два аспекта структурообразования агрегата: а) поведение упруго-анизотропного индивида, его формоизменение в процессе структурообразования агрегата; б) поведение агрегата упруго-анизотропных индивидов в изменяющихся внешних условиях, собственно сам процесс структурообразования.

В решении указанных проблем мы опираемся на физические модели, с помощью которых объяснялись "частные" процессы структурообразования кварцевой породы на отдельных этапах ее развития.

Решение этой кардинальной проблемы генетической минералогии приводит к уточнению существующих представлений о зависимости предела упругости, текучести и прочности минерала от особенностей его кристаллической структуры в данных условиях среды. Отметим, что указанные представления даже для более изученных материалов с металлическим типом связей еще неоднозначны.

Отсутствие достаточно удовлетворительной теории прочности вынуждает автора попытаться охватить указанные весьма сложные явления, лежащие в основе поведения индивида в агрегате, простыми эмпирическими соотношениями, которые позволили бы установить причины изменчивости индивидов на основе изучения изменчивости их форм. Физическая природа явления может быть понята с учетом развития: упругой деформации, внутризеренных нарушений, формоизменения.

При обсуждении указанных проблем принимаем (см. раздел "Общие сведения о кварце"), что породообразующий кварц в земной коре (от условий выветривания до глубинного метаморфизма) представлен низко-температурной модификацией.

Упругая деформация упругоанизотропного индивида в агрегате. При изменении факторов (гравитационного, термического, тектонического или их совокупности), действующих на кристаллический агрегат, "приспособление" последнего к новым условиям в первую очередь происходит за счет упругой деформации. Это — наиболее естественный и простой путь достижения стационарного состояния. Деформация агрегата в поле внешних сил происходит по принципу "зерно на зерно", поэтому в основе упругой деформации агрегата лежит упругая деформация слагающих агрегат индивидов. В основе деформации последних — ответная реакция индивидов на внешнее воздействие. Указанная ответная реакция определяется в первую очередь особенностями внутреннего строения индивида, взаимодействием слагающих кристаллическую структуру индивида элементов (для кварца — ионов), выраженным в обобщенном виде в анизотропии его упругих свойств.

Проблема напряжений, действующих на отдельное зерно агрегата, — по-видимому, одна из самых сложных. Сложность не только в том, что в условиях поверхности Земли действуют преимущественно ориентированные нагрузки, а в условиях глубинности преобладает всестороннее сжатие и тектоническое воздействие осуществляется на его фоне. Решение проблемы значительно усложняется тем, что отдельное зерно в агрегате контактирует с большим количеством зерен-соседей (для гранобластовых структур — до 30 и более [84]) и, следовательно, возникновение сложно-напряженного состояния зерна неизбежно.

Рассматривая упругую деформацию как ответную реакцию на внешнее воздействие, весьма желательно обратиться к теории упругости и получить интересующие нас данные. Однако рассматриваемый случай — поведение упруго-анизотропного тела при неравномерном приложении внешней нагрузки — в теории упругости пока не исследован, так как упругие деформации в настоящее время рассчитываются только для отдельных видов анизотропии, имеющих простую симметрию. Собственно этим и вызвана

попытка автора решить ключевой вопрос структурообразования агрегата на уровне простых эмпирических соотношений.

При рассмотрении поведения отдельного упруго-анизотропного кристалла кварца (индивида минерала) в условиях гидростатического сжатия, выраженная в упругой деформации ответная реакция упруго-анизотропного тела на внешнее воздействие, как известно, будет анизотропна и предопределяется только упругими характеристиками материала. Фигура упругости материала (указательная поверхность модуля Юнга) дает полное представление о возникающей упругой деформации, поскольку модуль Юнга является "показателем" ответной реакции индивида на внешнее воздействие.

Поведение кварца в условиях ориентированного сжатия сложнее, так как в этом случае будет иметь место взаимодействие анизотропии внешнего воздействия и анизотропии свойств. Поскольку кристаллическая структура деформируемого материала однородна и представляет собой единую конструкцию, элементы которой связаны между собой закономерными упругими связями, постольку реакция минерального зерна на внешнее воздействие и в данном случае, по представлению автора, будет предопределяться упругими свойствами деформируемого материала, т.е. будет анизотропной и, главное, однородной по всему объему зерна. Положение максимальных и минимальных значений деформации в пределах зерна будет предопределяться упругими константами материала.

В случае двух контактирующих зерен кварца в условиях сжатия картина развития упругой деформации еще более усложняется. При различной пространственной ориентировке кристаллических решеток индивидов последние при одном и том же внешнем воздействии и возникшем межзеренном напряжении будут испытывать, в пределе, различную по интенсивности упругую деформацию, предопределяемую упругими константами зерен в зоне контакта. При этом, как и в случае отдельного зерна, упругая деформация каждого из контактирующих зерен будет однородна в пределах индивида, анизотропна, а пространственная ориентировка возникшей анизотропной упругой деформации в каждом из зерен будет, в общем случае, различна.

Развитие упругой деформации кварцевого зерна в агрегате намного сложнее, чем в рассмотренных примерах, поскольку каждое зерно агрегата контактирует со значительным числом аналогичных зерен-соседей. Каждое зерно в агрегате не может изменять свои размеры в полном соответствии с анизотропией его упругих свойств или связанных с ними коэффициентов термического расширения, линейной сжимаемости или их совокупности — этому препятствуют прочные связи с соседними зернами. В рассматриваемых условиях при различной пространственной ориентировке индивидов в агрегате одни зерна неизбежно будут испытывать большую деформацию, чем зерна соседние. Особо подчеркнем, что ответная реакция упруго-анизотропного индивида на сумму действующих усилий (межзеренных напряжений), приложенных к отдельным участкам поверхности индивида, в основном определяется не локальными реакциями индивида на наиболее нагруженных участках, а общей реакцией его кристаллической структуры на суммарное внешнее воздействие. В силу указанного структурного контроля ответная реакция упруго-анизотропного индивида агре-

гата в условиях объемного напряжения будет однородной и анизотропной. Под термином "анизотропная упругая деформация", как и в ранее рассмотренных случаях, понимаем, что в индивиду величина и пространственное положение минимальных и максимальных значений упругой деформации однозначно ориентированы по всему объему индивида и их положение предопределяется и контролируется максимальными и минимальными значениями модуля упругости материала.

Отметить, что если внешняя среда ограничивает деформацию материала, то предел его упругости (установленный для обычных условий) может быть превзойден в десятки раз. Исходная анизотропия упругих свойств кварца, судя по полученным нами данным, в указанных условиях сохраняется.

Внутризеренные нарушения упруго-анизотропного индивида в деформируемом кристаллическом агрегате. Начальные стадии необратимой деформации индивида в агрегате проявляются в аномальном угасании. Такие относительно слабые эффекты неоднородного распределения внутренних напряжений требуют дополнительного исследования и в настоящей работе не рассматриваются.

При дальнейшем увеличении механических напряжений, действующих в объеме поликристалла, установившееся за счет упругой деформации стационарное состояние в системе индивид—окружающие его зерна нарушается. Объемно-напряженное состояние отдельных индивидов агрегата в указанных условиях возрастает до максимально возможного значения для данной кристаллической структуры в данных геологических условиях, т.е. в индивидах возникают предельные упругие напряжения. Их релаксация, осуществляемая различными механизмами, наглядно проявляется в форме зон внутризеренных нарушений, связанных в своем развитии с пластической деформацией, хрупким разрушением, образованием высокобарных фаз и витрификацией.

Изучение остаточных внутризеренных деформаций (нарушений, повреждений), развивающихся в различных геологических условиях, позволяет выделить для кварца три типа таких нарушения (для наглядности ориентировка нарушений здесь и в дальнейшем приводится относительно экстремальных значений модуля упругости для свободного монокристалла): а) нарушения, связанные с пластической деформацией — деформационные полосы, полосы (пластины) изгиба; они ориентированы субперпендикулярно направлению E_{\min} , обычно одному из трех возможных направлений в кристалле; б) нарушения, связанные с развитием хрупкой деформации, — планарные элементы — ориентированны параллельно направлению E_{\min} ; в) элементы хрупкого разрушения, которые ориентируются параллельно направлению E_{\max} , — планарные трещины, трещины отрыва, скола.

На больших глубинах высокая температура и высокие давления (большие нормальные напряжения сжатия) препятствуют развитию хрупкого разрушения, напряжение хрупкого разрушения оказывается выше напряжения течения материала. В результате релаксация упругих анизотропных напряжений происходит путем пластической деформации. Ориентировка внутризеренных нарушений 1-го типа, субперпендикулярная E_{\min} , указывает на то, что в данном случае упругая энергия индивида достигала наибольших значений [145].

Вблизи дневной поверхности при кратковременном воздействии развиваются нарушения 2-го типа. Отсутствие следов пластической деформации свидетельствует о том, что в этих условиях нагружения напряжение хрупкого разрушения близко к пределу упругости. То, что планарные элементы субпараллельны E_{\max} , позволяет считать, что в этом случае энергия упругих напряжений была минимальна.

Условия проявления нарушений 3-го типа требуют дополнительного исследования, однако есть основания предполагать, что они могут проявляться при относительно невысоких боковых нормальных напряжениях.

В свете приведенных данных сущность природы внутризеренных нарушений в первом приближении сводится к тому, что в новых, изменившихся условиях ориентировка индивидов агрегата не будет соответствовать стабильной. Для того чтобы вернуть индивид в стационарное состояние, необходимо "снять" "наведенные" внешним воздействием упругие перенапряжения. Поскольку ориентировка внутренних напряжений и запасенная упругая энергия контролируются упругой анизотропией индивида, постольку пути последующей релаксации также контролируются его упругими свойствами.

Представление о том, что анизотропия упругих свойств индивида предопределяет возможность развития в нем внутризеренных нарушений, представляется весьма важным. Из него, в частности, следует, что для отдельного индивида развитие таких процессов, как пластическая деформация, хрупкое разрушение, а также плавление и полиморфные превращения, имеют одну и ту же движущую силу — изменение энергии системы индивид — агрегат в сторону устойчивого состояния. Основным вклад в общий баланс энергии — энергия упругая.

В рамках данного исследования анизотропия упругих свойств индивида выступает в первую очередь в качестве фактора, определяющего связь механических свойств тела с условиями внешнего воздействия.

Связь развития высокобарных фаз и плавления с внутризеренными нарушениями представляет особый интерес по следующим причинам. Эти образования однозначно указывают, что внутризеренные нарушения — зоны со специфическими $P-T$ условиями, параметры которых значительно превышают средние $P-T$ параметры по объему зерна. Указанные условия предопределяют возможность появления значительных давлений и температур, чтобы образовались высокобарные фазы или произошло, в случае выделения большого количества теплоты, плавление в узкой области кристалла — в зоне скольжения (сдвига). Тот факт, что развитие указанных зон контролируется анизотропией упругих свойств индивида (зоны нарушения ориентируются субпараллельно E_{\max}), — лишнее подтверждение сделанного вывода о том, что анизотропия упругих свойств материала определяет связь его физико-механических свойств с условиями внешнего воздействия.

Формоизменение упруго-анизотропных индивидов в деформируемом кристаллическом агрегате. Изучение изменения формы индивидов в агрегате существенно кварцевой породы в осадочном и метаморфическом циклах ее развития показало следующее. В процессе литификации в исходном песчаном материале наблюдается отчетливое изменение формы лишь отдельных зерен. Последнее связано с развитием межзеренных структур

растворения под давлением, регенерации и "внутризеренной" пластической деформации. В условиях метаморфизма формоизменение характерно уже для всех индивидов агрегатов (однонаправленная пластическая деформация, рекристаллизация, перекристаллизация в твердом агрегате).

Изменение формы зерна кварца относительно его оптической оси происходит, в зависимости от процесса и механизма формоизменения, закономерно, но под различными углами ($\pm 10\%$): преимущественный рост (регенерация) 20° , пластическая деформация 20° , преимущественный рост (рекристаллизация) 45° , преимущественное растворение 70° .

Нетрудно видеть, что изменение формы индивидов связано с особенностями их кристаллической структуры. Как и в случае рассмотренных внутризеренных нарушений, формоизменение индивида в агрегате контролируется модулями упругости низкотемпературного кварца (фиг. 4). Пластическая деформация развивается в направлении, перпендикулярном E_{\min} , регенерация — также перпендикулярно E_{\min} , преимущественный рост — субпараллельно E_{\max} , растворение — субпараллельно E_{\min} .

Изложенное позволяет считать, что природа необратимого формоизменения отдельного упруго-анизотропного индивида в деформируемом кристаллическом агрегате, несмотря на различие механизмов, может быть понята и объяснена, как и в рассмотренных ранее случаях, через раскрытие и описание ответной реакции минерального зерна на изменение внешних условий, реакции, контролируемой анизотропией упругих свойств индивида.

Физический смысл формоизменения индивида видится в развитии стационарного состояния индивида в агрегате, осуществляемого различными механизмами изменения упругой энергии в сторону устойчивого состояния, что предопределяется конкретными внешними условиями. Следует учитывать, что изменение упругой энергии в упруго-анизотропном индивиде анизотропно, поэтому анизотропным будет и формоизменение индивида в агрегате.

Основной закон поведения упруго-анизотропного индивида в деформируемом кристаллическом агрегате. Основываясь на приведенных результатах, можно констатировать, что упругая деформация, внутризеренные нарушения и изменение формы индивида могут рассматриваться как проявление различных стадий развития единого явления — поведения индивида в деформируемом агрегате в условиях возрастающих параметров внешнего воздействия.

Все поведения упруго-анизотропного индивида в агрегате определяется его реакцией на изменение внешних условий, контролируемой анизотропией упругих свойств индивида. Указанная реакция рассматривается автором в качестве нового, наиболее сильного фактора (фактор анизотропии индивида), контролирующего все особенности динамичности кристаллической структуры индивида, т.е. все особенности ее деформации.

Все "действие" фактора анизотропии направлено на сохранение в изменяющихся условиях среды стабильного состояния индивида в агрегате вследствие изменения упругой энергии индивида в сторону устойчивого состояния. Значение фактора анизотропии индивида заключается в том, что он позволяет понять основную сущность формоизменения индивида: поведение его в изменяющихся внешних условиях обус-

ловлено взаимодействием двух составляющих: упругой и хрупкой (хрупкое разрушение), упругой и пластической (пластическая деформация), упругой и плавления (витрификация), упругой и растворения (структуры растворения под давлением) и т.д. Упругая составляющая является ведущей, т.е. ответная реакция индивида, предопределяемая анизотропией его упругих свойств на изменение внешнего воздействия, контролирует развитие второй составляющей: анизотропию разрушения, пластичности, роста, растворения, витрификации и т.д.

Установление фактора анизотропии представляется весьма важным шагом в решении всей проблемы поведения индивида в деформируемом кристаллическом агрегате, поскольку на его основе впервые появляется возможность через упругую деформацию связать между собой такие внешне различные процессы, как пластическая деформация, хрупкое разрушение, растворение, рост, рекристаллизация, витрификация и полиморфные превращения.

В рассмотренных процессах общими являются: причины развития — изменение внешних условий, движущая сила — изменение упругой энергии, направление развития — становление стационарного (в пределе — равновесного) состояния в новых изменившихся условиях. Различия заключаются лишь в механизмах достижения стационарного состояния.

Все изложенное выше позволяет объединить знания о процессах поведения индивидов в концепцию о его формоизменении в деформируемом агрегате. Весь приведенный материал, — по существу, развернутое описание предлагаемой концепции. А ее основной физический смысл может быть представлен в виде общего закона формоизменения (поведения, функционирования) упруго-анизотропного индивида в деформируемом кристаллическом агрегате (в поле его устойчивости): **ф о р м о и з м е н е н и е у п р у г о - а н и з о т р о п н о г о** индивида в деформируемом кристаллическом агрегате независимо от особенностей внешнего воздействия и конкретного механизма явления определяется изменением упругой энергии в сторону устойчивого состояния, которое контролируется упругими свойствами индивида.

Закон поведения порообразующего кварца справедлив как для условий увеличивающихся параметров среды и внешнего воздействия (прогрессивная стадия развития породы), так и для условий их уменьшения (регрессивная стадия развития породы). Поскольку большинство кристаллических представителей минерального мира (кристаллы, индивиды агрегатов) обладают анизотропией упругих свойств более выраженной, чем у кварца, поскольку установленные фактор анизотропии и общий закон формоизменения упруго-анизотропного индивида в агрегате должны иметь более общее значение. Возможность их применения к объяснению поведения отдельного кристалла в изменяющихся условиях среды допускается.

Весьма интересными представляются следствия, вытекающие из закона формоизменения индивида. Следствие 1: развитие в упруго-анизотропном кристаллическом теле таких, связанных с несовершенством кристаллической решетки явлений, как дислокации, вакансии, диффузия, — проявление различных механизмов изменения упругой энергии в сторону устойчивого состояния, что определяется не столько изменением внешних условий,

сколько реакцией анизотропных упругих свойств индивида на указанное изменение. Следствие 2: учет внутренней реакции анизотропно-упругих свойств кристаллического минерала на внешнее воздействие позволяет объяснить и предвидеть изменение таких физических свойств кристаллов, которые в настоящее время не могут быть рассчитаны на основе существующей схемы законов атомного строения, — рост, пластичность и прочность.

*Структурообразование кристаллического мономинерального агрегата
в изменяющихся внешних условиях*

Сложность решения одной из фундаментальных проблем современной петрографии — структурообразования — заключается в том, что минеральная масса земной коры в зависимости от геологических условий может вести себя и как упругое тело, и как пластичное, и как хрупкое, а также может претерпевать полиморфные и минеральные преобразования и подвергаться плавлению.

Процессы структурообразования целесообразно рассматривать отдельно по двум группам: процессы, происходящие в условиях стабильности данной минеральной ассоциации (структурообразование) и процессы, связанные с неустойчивостью минеральной фазы (полиморфные превращения, изменение минерального состава). В работе более подробно рассмотрены процессы первой группы.

Структурообразование кварцевой породы. При рассмотрении структурообразования кварцевой породы необходимо учитывать установленную ранее определенную упорядоченность в ее пространственном строении, которая возрастает от осадочных пород к метаморфизованным.

Совокупность упруго-анизотропных закономерно ориентированных индивидов в пространстве предопределяет анизотропию упругих свойств породы. В общем случае анизотропия упругих свойств агрегата менее отчетлива, чем анизотропия тех же свойств отдельного слагающего агрегат индивида.

В свете проведенного изучения природы формоизменения зерен сущность структурообразования кварцевой породы сводится к следующему. Структурообразование кристаллического агрегата определяется динамическим равновесием двух факторов: внешнего воздействия и ответной реакции породы, контролируемой анизотропией упругих свойств материала. В результате взаимодействия этих факторов горная порода стремится к стационарному (в пределе — равновесному) состоянию вследствие изменения упругой энергии.

Увеличение параметров внешнего воздействия влечет увеличение интенсивности ответной реакции породы. Соответствие поля внутренних напряжений внешнему полю может быть достигнуто путем обратимого изменения упругой энергии лишь на начальном этапе развития явления. В дальнейшем приближение к равновесию достигается в результате развития (условия эпигенеза) межзеренных структур растворения и регенерации, а также "внутризеренной" пластической деформации. В данном случае переход к стационарному состоянию напоминает "мозаичное равновесие", по академику Д.С. Коржинскому.

В условиях метаморфизма стационарное состояние достигается однонаправленной переориентировкой всех слагающих породу зерен, т.е. путем пластической деформации и рекристаллизации. Наиболее полным соответствие поля внутренних напряжений внешнему полю, по-видимому, будет в том случае, когда все индивиды окажутся одинаково ориентированными в пространстве, — предельная ориентировка индивидов агрегата типа "монокристалл" (S-тектонит).

Естественно, этот процесс может идти при условии, что изменение структурных признаков успевает за изменением внешних условий. Если же темпы изменения условий среды велики и указанная структурная перестройка осуществима не полностью или не на всех масштабных уровнях, то происходит хрупкое разрушение породы, которое можно считать также одним из путей перехода ее к стационарному состоянию.

Влияние упруго-анизотропных свойств материала на особенности развития в нем структурных преобразований в условиях увеличивающегося внешнего воздействия видится в следующем. На начальной стадии развития структурных изменений агрегата основную роль играет взаимодействие между слагающими его зернами, предопределяемое их упругими константами. В условиях метаморфизма ведущая роль внешнего воздействия выявляется весьма отчетливо, так как все зерна агрегата, в пределе, стремятся изменить свою ориентировку таким образом, чтобы параллельно направлению максимального напряжения сжатия ориентировалось одно из направлений E_{\min} (условие равновесия зерна в агрегате).

Возможно, что в масштабе массива горной породы напряженное состояние не будет одинаковым, но указанная тенденция однонаправленного изменения пространственной ориентировки зерен будет сохраняться для всех участков массива.

Рассмотренный в работе пример хрупкой деформации (плоскости скольжения) показывает отчетливую связь направления скольжения с упругими свойствами породы. В структурной геологии рассматриваются многочисленные примеры связи проявления пластической деформации с хрупким разрушением пород. Они достаточно убедительно указывают на то, что анизотропия упругих свойств материала контролирует развитие и пластической деформации, и хрупкого разрушения.

Проблема в целом ждет своего окончательного решения, однако уже сейчас, основываясь на результатах проведенного изучения хрупкой деформации индивида, можно утверждать, что в зависимости от внешних условий хрупкое разрушение породы развивается либо субпараллельно E_{\min} , либо идет в направлении, субпараллельном E_{\max} . Более того, приведенные данные позволяют считать, что реакция породы на внешнее воздействие, контролируемая анизотропией упругих свойств минерала, — основной фактор структурообразования.

Выявление ведущего фактора структурообразования представляется важным шагом в познании рассматриваемого явления, поскольку позволяет более глубоко прочесть геологический смысл структурообразования породы — процесса, отражающего пути адаптации ее к изменяющимся внешним условиям. Очевидно, что сказанное относится не только к рассмотренным в работе кварцевым породам, но и к иным минеральным агрегатам, сложенным упруго-анизотропными индивидами.

Изменение минерального состава породы. Структурообразование полиминеральных кристаллических пород нарушается изменением минерального состава, что заметно усложняет рассматриваемое явление. В данном случае мы имеем дело с наглядным проявлением широко развитых в земной коре метаморфических процессов. Суть метаморфизма, согласно существующим представлениям, заключается в том, что при изменении термодинамических условий среды происходит потеря устойчивости одних минеральных ассоциаций и замещение их другими, устойчивыми в новых условиях. Наиболее важные сведения исследователи получают по ассоциациям пород, которые, как полагают, фиксируют стадии резкой смены P - T условий метаморфизма. Однако для суждения о физической природе минералообразования, а также о роли и месте этого явления в эволюции горной породы уровень существующих обобщений представляется недостаточным.

Полученные автором данные заставляют обратить внимание на то, что новообразованные минералы должны обладать минимальным для изменившихся условий уровнем упругой энергии; это — необходимое условие устойчивости новообразований минеральной ассоциации в изменившихся условиях. Не менее важны и структурные особенности новообразованной ассоциации минеральных зерен: в идеале новообразованный агрегат должен обладать равновесной структурой, в которой каждое упруго-анизотропное зерно должно находиться в стационарном (в пределе — равновесном) состоянии. Следовательно, при изучении деформации минералов исходной породы, возникновения и пространственной ориентировки новообразующихся минеральных фаз в изменяющихся внешних условиях необходимо учитывать основополагающий фактор явления — реакцию материала, контролируемую анизотропией его упругих свойств.

Структурообразование в условиях регрессивного метаморфизма. Уточнение сущности структурообразования кварцевой породы в условиях регрессивного метаморфизма в конечном итоге приближает нас к решению проблемы генезиса удлиненной формы обломочного кварца. Сложность решения этой проблемы обусловлена тем, что в конце прогрессивного метаморфизма удаляется вода, и система, по существу, становится герметичной в отношении обратной воды, которая необходима для последующих регрессивных реакций гидратации. При движении к поверхности "запасенные" при более высоких термодинамических параметрах, соответствующих условиям формирования породы, упругие напряжения "высвобождаются" — релаксируются.

Указанный механизм лежит в основе выветривания минеральных агрегатов на дневной поверхности ("химическое" и "физическое" выветривание [36]).

Хрупкое разрушение индивида кварцевой породы в условиях выветривания происходит по сериям субпараллельных внутризеренных нарушений, положение которых контролируется упругими константами минерала. В рассмотренном выше примере (фиг. 5 и 6) (природный песок) становление удлиненной формы зерен связывается с развитием внутризеренных нарушений, субперпендикулярных E_{min} , что подтверждает представление о том, что нерелаксированные упругие напряжения — основная движущая сила выветривания.

В литературе можно встретить достаточно примеров, подтверждающих, что нерелаксированные упругие напряжения могут и должны рассматри-

ваться в качестве одной из основных движущих сил выветривания, как бы "самоуничтожающих" на поверхности Земли породы, сформированные при более высоких термодинамических параметрах.

Общий закон структурообразования. Установление роли анизотропии как фактора структурообразования представляется весьма важным шагом в решении всей проблемы изменения структурных признаков кристаллического агрегата, так как позволяет через упругую деформацию связать между собой такие внешне различные "частные" процессы, как межзеренное растворение, регенерация, пластическая деформация, рекристаллизация, полиморфные превращения, минеральные преобразования и разрушения.

Результаты сравнительного изучения изменения структурных признаков кварцевых пород в условиях метаморфизма погружения положены в основу концепции структурообразования любых кристаллических агрегатов в изменяющихся геологических условиях. Концепция структурообразования породы рассмотрена в данной книге, и ее физический смысл может быть сформулирован следующим образом: структурообразование кристаллического агрегата в изменяющихся геологических условиях представляет собой активный саморегулирующийся процесс становления стационарного (в пределе — равновесного) состояния в системе кристаллический агрегат — геологическая среда, развивающийся в результате изменения упругой энергии; ее изменение определяется контролируемой анизотропией упругих свойств внутренней реакцией материала на изменение внешних условий и осуществляется в зависимости от характера и интенсивности проявления последних различными механизмами.

Основное следствие, вытекающее из закона структурообразования агрегата: при изучении фундаментального свойства материальной системы — структурообразования — необходимо использовать и фундаментальную характеристику слагающих систему элементов — анизотропию их упругих свойств.

Поведение геологических объектов в изменяющихся внешних условиях

Установленные автором законы формоизменения индивида и структурообразования агрегата дают возможность приблизиться к пониманию сущности поведения минерально-горнопородного геологического объекта в земной коре.

Слагающие земную кору минералы, горные породы, формации, подвергаясь воздействию объемных механических сил (напряжений, стрессов), формируют современную структуру земной коры. Неоднородность, цикличность, неравномерность процессов орогении, эрозии, метаморфизма и плутонизма лежат в основе ее развития. В настоящее время известны расположение и размеры разномасштабных тектонических структур земной коры. Общеизвестен и тот факт, что с главными тектоническими элементами коры сопряжено образование различных структур более мелкого порядка.

Чтобы не потерять ориентировку в многообразии высказываемых мнений и выборе правильного направления исследования, в настоящее время крайне желательно иметь достаточно обоснованную концепцию, поз-

воляющую рассматривать структурообразование объектов земной коры в рамках единой системы знаний, объяснять с единых позиций природу, пути и механизмы становления данного явления. Создание подобной концепции требует решения одной из кардинальных проблем современной геологии — проблемы поведения геологического объекта в изменяющихся условиях среды. Указанная проблема является все еще новой для всего комплекса наук о Земле и, в частности, для теоретической тектоники, претендующей на роль руководящей науки в изучении земной коры.

Уточнение сущности поведения (функционирования) геологического объекта в изменяющихся внешних условиях встречает определенные затруднения, поскольку в этом случае, как и в случае поведения горной породы, необходимо объединить в рамках единой концепции знания о совершенно различных процессах, каждый из которых более или менее известен, но которые, насколько их понимают, совершенно различны. Положение осложняется тем, что пока четкие представления о природе указанных процессов отсутствуют, а масштабы геологических объектов высших рангов иерархии недоступны непосредственному наблюдению в поле. Здесь не помогут тенденция широкого использования теоретических схем, заимствованных из фундаментальных наук с более развитым теоретическим аппаратом, — механики, физики, химии. В указанных областях знаний распространен "изотропный" подход к объяснению сущности явлений, не учитывающий специфики вещества геологических объектов.

Существующая в геофизике практика реконструкции полей напряжений, проводимых по следам деформации, — лишь геометрический метод; механическая интерпретация вероятных полей напряжения не вскрывает в полной мере физическую природу явления.

Весьма сложно решение проблемы закономерного развития метаморфических явлений в общей картине преобразования минеральной массы земной коры. Судя по полученным данным, основной путь развития минеральной массы земной коры — непрерывно-дискретный; под этим термином понимается закономерное чередование структурных изменений и минеральных преобразований на всех уровнях вещественной иерархии.

Имеются сложности и с изучением проявления магматизма.

Вместе с тем общая концепция поведения вещественного геологического объекта в изменяющихся внешних условиях может быть создана. Основанием для ее построения могут служить представления: об однотипной системной организации вещественных геологических объектов всех уровней иерархии земной коры; о генетической и парагенетической связи между собой всех геологических объектов; о сходстве причин, управляющих поведением последних, их однотипности и однонаправленности; об единстве природы физических явлений, лежащих в основе поведения геологических объектов; о ведущей роли анизотропии упругих свойств отдельного элемента в функционировании объекта (системы).

Уточнение природы структурообразования ранговых геологических тел требует в первую очередь учета их иерархии и связанных с ней тектонических проявлений. Основываясь на "законе соответствия", принимаем, что каждому классу ранговых геологических тел соответствует свой класс дизъюнктивов и пликативов. В табл. 6 приведена схема соотношения ранговых геологических тел и связанных с ними тектонических проявлений;

Т а б л и ц а 6

Схема соотношения ранговых геологических тел
и связанных с ними тектонических проявлений

Естественное геологическое тело [54]	Дизъюнктивы [54]	Пликативы
Геосфера	Линеамент	Геосинклиальная система
Геокмплекс	Глубинный разлом	Складчатый комплекс
Геотформация	Разлом	Складка
Кристаллическая порода	Трещина	Площатость
Минеральное зерно (минерал)	Планарные элементы, планарные трещины	Деформационные полосы Полосы изгиба

ранговые поля напряжений, метаморфические преобразования по указанным выше причинам на схеме не отражены.

Раскрытию геологической сущности структурообразования вещественных геологических объектов помогает прием, широко используемый в физике, суть которого заключается в следующем: результаты, полученные при изучении природы геологического объекта на низшем уровне иерархии, могут быть использованы при объяснении поведения объекта более высоких рангов иерархии (принцип редукционизма). Согласно этому принципу, результаты изучения поведения индивида в агрегате и агрегата индивидов (т.е. двух низких последовательных уровней организации вещества) могут быть положены в основу расшифровки поведения всех ранговых геологических тел земной коры.

Используя этот прием, получаем общее представление о сущности рассматриваемого явления, заключающееся в следующем: изменение условий среды вызывает ответную реакцию объекта; реакция контролируется анизотропией его упругих свойств; указанная причина (фактор анизотропии) определяет и появление "наведенной" внешним воздействием упругой энергии, и ее последующее изменение в сторону устойчивого состояния.

Внешнее воздействие может изменяться достаточно медленно, и в этом случае возникающие упругие перенапряжения могут быть "сняты" структурными изменениями породы (в основном — пластическая деформация, рекристаллизация, минеральные преобразования). В случае, если релаксация не поспевает за скоростью изменения "наведенных" внешним воздействием упругих перенапряжений, происходит хрупкое разрушение или плавление. Главное здесь — в анизотропном поле напряжений пластическая деформация объекта будет развиваться в направлении, перпендикулярном минимальному значению его упругой деформации, а хрупкое разрушение — в направлении, ей субпараллельном. Возможность развития хрупкого разрушения в направлении, субпараллельном максимальному значению упругой деформации, требует уточнения.

Несмотря на то, что высказанные представления несколько условны, так как многие стороны явления остаются неуточненными, автор считает возможным отразить их в следующей общей закономерности поведения вещественного геологического объекта в изменяющихся условиях среды и внешнего воздействия: п о в е д е н и е в е щ е с т в е н н ы х г е о л о -

гических объектов любого уровня иерархии отражает активный саморегулирующийся процесс становления стационарного состояния объекта в изменяющихся условиях среды; процесс обусловлен изменением упругой энергии в сторону устойчивого состояния; развитие явления контролируется единой причиной — реакцией упруго-анизотропных свойств на внешнее воздействие, но имеет в зависимости от характера и интенсивности последнего различные механизмы проявления (упругая деформация, пластическая деформация, хрупкое разрушение, преобразование минерального состава, плавление).

Полученные академиком М.А. Садовским [83] данные о дискретном распределении составляющих земной коры по их размерам дают основание предполагать подобие процессов разрушения в пределах всех выделенных рангов иерархии; это подтверждает объективность выдвигаемой автором настоящей книги концепции поведения геологических объектов.

Сопоставление некоторых особенностей эволюции геологических и биологических объектов

Основываясь на представлении о том, что организация и эволюция материальной системы взаимосвязаны, установленные выше закономерности организации вещественных геологических объектов (строение, взаимодействие частей, внутренняя динамика) позволяют приблизиться к уточнению их эволюции.

Следуя логике установленных закономерностей, полагаем, что основным фактором эволюции вещественного геологического объекта, независимо от ранга иерархии, является внутренняя реакция объекта на внешнее воздействие, контролируемая анизотропией его упругих свойств (АУС). В зависимости от параметров среды и внешнего воздействия указанный фактор контролирует развитие и смену процессов эволюции геологического объекта — процессов уменьшения его свободной энергии в сторону устойчивого состояния. Совокупность различных эволюционных процессов, отраженных в структурообразовании вещества объекта, минеральных преобразованиях и разрушении, обуславливает непрерывно-дискретный ход эволюции объекта.

Основа содержания эволюции вещественного геологического объекта видится в способности автоматически поддерживать возникшее при его образовании стационарное состояние в изменяющихся условиях среды.

Изложенные выше представления не только объясняют физический смысл распространенного представления о потенциальной приспособляемости (адаптации) объекта к изменяющимся условиям среды, но и позволяют сформулировать основную закономерность эволюции вещественного геологического объекта любого ранга иерархии: эволюция вещества веного геологического объекта определяется эволюцией внешних условий.

Представление о эволюции внешних условий может прямо или косвенно связываться с развитием Вселенной: однонаправленность расширения Вселенной в конечном итоге обуславливает однонаправленность эволюции Земли и, в частности, интересующей нас ее внешней кристаллической части — земной коры и всех слагающих ее геологических объектов.

Сопоставление полученных данных об эволюции геологических объектов с существующими представлениями об эволюции живой материи подтверждает их относительное сходство. Исторический процесс развития неживой природы, как и в случае биологических объектов (в данном случае понимается уровень экологических единств), идет в направлении соответствия между геологическим объектом и постоянно изменяющейся геологической средой. Различие — в механизмах достижения стационарного состояния и основополагающих факторах, их определяющих: ДНК — для отдельных организмов и АУС — для индивидов агрегата.

В определенных отношениях в отличие от биологических объектов геологические объекты более "пластичны", легче и быстрее приспосабливаются к окружающей среде. Этому в немалой степени способствуют и четко обозначенные границы с окружающей средой, легкость структурной адаптации объекта и конкретный, единый фактор эволюции — АУС, контролирующий весь ход эволюции.

Вместе с тем выводы о сходстве эволюции геологических объектов с биологическими, выявленный физический смысл явления в определенной мере противоречат существующим теоретическим представлениям о структурообразовании неживой природы. Если в биологии идеи эволюции ассоциируются с усложнением организации системы (созиданием структур), то в классической термодинамике эволюционный закон отражает непрерывную дезинтеграцию — разрушение структуры, первоначально существовавшей в системе (принцип Карно—Клаузиуса). Согласно существующим представлениям, оба аспекта теории эволюции отражают различные стороны физической реальности — различные термодинамические ситуации: в одном случае (в биологии) структуры возникают вблизи от равновесия, в другом (в термодинамике) рождаются за пределами устойчивости — вдали от равновесия; с приближением к термодинамическому равновесию изначально заданная структура разрушается.

Вместе с тем предложенная И. Пригожиным теория математической формализации "статического механизма" принципа Ле-Шателье, объясняющая существование диссипативных (упорядоченных) структур вдали от равновесия, корректно применима только для гомогенных, бесструктурных систем, состоящих из множества не обладающих никакими различиями элементов. В случае геологических объектов, несмотря на математическую строгость доказательств, целесообразность применения рассматриваемой теории требует дополнительной аргументации, так как каждый элемент реальной геологической системы обладает анизотропией физико-механических свойств.

Выявленные в настоящей работе особенности физической природы эволюционных преобразований минерального мира указывают на необходимость и реальность создания новой термодинамической теории эволюции минеральных масс — теории "созидания структур", отражающей развитие структур неживой материи вблизи от равновесия. Опыт изучения минеральных преобразований в условиях метаморфизма подтверждает целесообразность создания такой теории.

О принципе структурности

Установленные законы формоизменения индивида и структурообразования кристаллического агрегата, как и закономерности поведения геологического объекта, позволяют считать, что изучение поведения вещественного геологического объекта любого ранга иерархии подчиняется одному и тому же принципу, который можно назвать „принципом структурности“. Этот принцип отражает тот факт, что при описании функционирования вещественного геологического объекта в изменяющихся условиях среды необходимо учитывать предопределяющую и контролирующую роль анизотропии упругих свойств, присущих данному объекту в конкретных внешних условиях.

Применение принципа структурности в геологической практике, как можно было видеть из приведенного в книге материала, позволяет совершенно по-новому подходить к решению многих фундаментальных проблем, связанных со структурообразованием. Это касается уточнения сущности отдельных происходящих в кристаллических и поликристаллических материалах процессов, обоснования возможности объединения упругих свойств, пластичности и хрупкого разрушения кристаллического агрегата в единой системе знаний, создания единой концепции структурообразования кристаллического агрегата, вобравшей в себя все „частные“ процессы изменения его структурных признаков, а также уточнения природы структурных особенностей, функционирования и эволюции вещественных геологических объектов любых рангов иерархии.

Установление фактора анизотропии, общих законов поведения индивида и агрегата, закономерностей функционирования геологических объектов и принципа структурности имеет особое значение, поскольку впервые при изучении структурообразования минерального мира исследователь на основании указанных принципов имеет возможность рационально организовать свою работу и, пользуясь указанными законами поведения, проверить правильность получаемых результатов.

Хотелось бы особо отметить, что установление принципа структурности стало возможным лишь на основе предложенного автором нового принципа познания — „принципа структурной причинности“, связывающего причину и следствие через процесс, посредством которого следствие проявляется в виде, доступном для исследования.

Применение принципа структурной причинности позволило глубже проникнуть в сущность поведения зерен в агрегате, структурообразования агрегата, функционирования и эволюции вещественного геологического объекта. Последнее достаточно убедительно показывает целесообразность применения принципа структурной причинности при исследовании конкретных объектов различных естественных наук.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая работа представляет собой попытку построения основ общей теории структурообразования кристаллических агрегатов, руд и горных пород на примере изучения структурных изменений кварцевой породы в осадочном и метаморфическом циклах ее развития. Исследование проводилось по следующей схеме: от выбора системы методологических принципов и основных понятий — к выбору системы методов исследования, далее — от целенаправленного сбора эмпирического материала и установления структурных изменений кварцевой породы к построению непротиворечивых физических моделей и их теоретическому обобщению.

Показано, что формирование структурных признаков кварцевой породы в ходе ее становления в условиях земной поверхности в основном обусловлено электрическим взаимодействием зерен друг с другом; это — основной поро- и структурообразующий фактор рыхлых осадочных пород. Дальнейшее изменение структурных признаков породы связано с увеличением давления и температуры, отражающих развитие метаморфизма погружения.

Поскольку естественной основой кристаллического агрегата является отдельное минеральное зерно — индивид минерала с его химическим составом, кристаллической структурой и физико-механическими свойствами, постольку на первом этапе изучения структурообразования агрегата пристальное внимание уделялось исследованию закономерностей изменения формы слагающих агрегат зерен кварца в таких „частных” процессах формоизменения индивида, как растворение, регенерация, пластическая деформация и рекристаллизация.

Анализ „частных” процессов формоизменения индивида показал, что их физическая сущность одна и та же: реакция индивида на внешнее воздействие, контролируемая анизотропией упругих свойств (фактор анизотропии индивида). Выявлено, что ф а к т о р а н и з о т р о п и и предопределяет и контролирует появление в индивиде „избыточной” упругой энергии, „наведенной” внешним воздействием, и пути ее последующей релаксации; он однозначно указывает, что упруго-анизотропный индивид кристаллического агрегата — весьма активный элемент системы. Применение фактора анизотропии позволяет устранить существующие трудности при анализе поведения упруго-анизотропного индивида в кристаллическом агрегате, вскрыть побудительные причины его саморегулирующегося поведения и рассматривать все процессы формоизменения индивида в агрегате в рамках единой концепции.

Основной физической смысл концепции отражен в о б щ е м з а к о н е ф о р м о и з м е н е н и я (поведения) минерального зерна в кристалличес-

ком агрегате: формоизменение упруго-анизотропного индивида в деформируемом кристаллическом агрегате независимо от особенностей внешнего воздействия и конкретного механизма явления определяется изменением упругой энергии в сторону устойчивого состояния, которое контролируется упругими свойствами индивида.

Закон формоизменения индивида в кристаллическом агрегате носит общий характер и в принципе может быть использован при изучении любых кристаллических пород, руд и отдельных кристаллов. Применение этого закона позволяет получить достоверную исходную информацию для различных научных дисциплин, имеющих дело с изучением кристаллического материала.

Анализ изменений структурных признаков в ходе развития кварцевой породы позволил автору предложить ряд моделей „частных” процессов структурообразования. Их физический смысл сводится к тому, что в любом „частном” процессе изменение структурных признаков функционально, а не является следствием случайных совпадений. Установление роли анизотропии как фактора структурообразования агрегата дает основание автору связать между собой через упругую деформацию такие внешне различные „частные” процессы, как межзеренное растворение, регенерация, пластическая деформация, рекристаллизация, полиморфные превращения, минеральные преобразования и разрушение.

На основе фактора структурообразования появилась возможность объединить знания о всех „частных” процессах структурообразования в рамках единой концепции, объясняющей причины, по которым из многообразия путей развития в условиях увеличивающегося воздействия среды кристаллическим агрегатом выбирается лишь один единственный. Понятное изложение концепции структурообразования кристаллического агрегата составляет основное содержание книги, а ее физический смысл отражен в следующем законе: **с т р у к т у р о о б р а з о в а н и е к р и с т а л л и ч е с к о г о а г р е г а т а в и з м е н я ю щ и х с я г е о л о г и ч е с к и х у с л о в и я х — э т о активный саморегулирующийся процесс становления стационарного (в пределе — равновесного) состояния в системе кристаллический агрегат — геологическая среда в результате изменения упругой энергии; ее изменение определяется контролируемой анизотропией упругих свойств внутренней реакцией материала на изменение внешних условий и осуществляется в зависимости от характера и интенсивности проявления последних различными механизмами.**

Закон структурообразования применим не только к изучению поведения любых кристаллических агрегатов. Установленные закономерности пороодообразования и структурообразования минеральных агрегатов могут быть использованы и при решении ряда других проблем, в частности — проблем синергетики, системных исследований в геологии, общей теории систем.

Результаты обсуждения проблемы структурообразования в данной книге нашли свое выражение в общей закономерности поведения геологических объектов: поведение вещественного геологического объекта любого уровня иерархии отражает активный саморегулирующийся процесс становления стационарного состояния объекта в изменяющихся условиях среды; процесс обусловлен изменением упругой энергии в сторо-

ну устойчивого состояния; развитие явления контролируется единой причиной — реакцией упруго-анизотропных свойств объекта на внешнее воздействие, но имеет в зависимости от характера и интенсивности последнего различные механизмы проявления (упругая деформация, пластическая деформация, перекристаллизация, хрупкое разрушение, преобразование минерального состава, плавление).

Установленная закономерность позволяет наметить пути ликвидации существующего разрыва в изучении структуры, функционирования и эволюции геологических объектов земной коры.

Результаты проведенного исследования легли в основу предлагаемого автором правила изучения структур вещественных геологических объектов — п р и н ц и п а с т р у к т у р н о с т и, учитывающего зависимость становления структурных признаков объекта от анизотропии его упругих свойств.

Совокупность установленных выше пороодообразующего фактора, фактора анизотропии и структурообразования, законов поведения индивида и агрегата, общей закономерности поведения и эволюции геологических объектов, а также принципа структурности рассматривается автором как реальная база, на основе которой могут быть созданы и теории „частных“ процессов структурообразования, и общая теория структурообразования кристаллических агрегатов. Создание указанной базы может способствовать целенаправленному изучению процессов, происходящих в литосфере, организации полученных результатов в полноценные теории структурообразования всех ранговых геологических тел, а также разработке — в дальнейшем — общей теории эволюции земной коры.

Расширение интересов минералогии и петрографии в сторону физического аспекта поведения индивидов в агрегате и структурообразования агрегата представляется одним из многообещающих направлений исследования. Успешное решение структурных проблем в рамках данных наук определяет достоверное решение проблем петротектоники, петрофизики, тектонофизики, структурной геологии, рудной геологии, геохимии и других наук, корнями своими связанными с минералогией и петрографией.

В заключение следует отметить, что полученные результаты могут быть использованы не только в геологии, но и в других фундаментальных науках при исследовании и объяснении сущности природы структурных объектов самых различных уровней структурной иерархии органического и неорганического мира.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барон Л.И., Керкелица Л.Г. Сопротивление горных пород отрыву. Киев: Наукова думка, 1974. 192 с.
2. Баюк Е.И., Делицин И.С., Силаева О.И. Влияние вестороннего давления на распределение скорости упругих волн в кварце. — В кн.: Физич. свойства горных пород при высоких термодинамич. параметрах. Киев: Наукова думка; 1971, с. 147–149.
3. Беликов Б.П., Александров К.С., Рыжова Т.В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. М.: Наука, 1969. 276 с.
4. Беликов Б.П., Залеский Б.В. Физико-механические исследования и опыт определения долговечности главных типов облицовочных камней из месторождений СССР. — Труды ИГН АН СССР, 1948, вып. 89.
5. Белоусов В.В. Главные особенности механизма тектонических деформаций. — В кн.: Очерки структурной геологии сложно-дислоцированных М.: Недра, 1977.
6. Белянкин Д.С., Петров В.П. Кристаллооптика. М.: Госгеолтехиздат, 1951. 128 с.
7. Бетехтин А.Г., Генкин А.Д., Филимонова А.А., Шадлун Т.Н. Структурно-текстурные особенности эндогенных руд. М.: Недра, 1964.
8. Блох А.М. Структура воды и геологические процессы. М.: Недра,
9. Богданов А.А. Всеобщая организационная наука (тектология). Изд. 3-е, Часть 1. М.-Л.: Книга, 1925, 300 с.
10. Бокий Г.Б., Порай-Кошиц М.А. Рентгеноструктурный анализ, М.: Изд-во МГУ, 1964, т. I.
11. Бокштейн С.З. Строение и свойства металлических сплавов. М.: Металлургия, 1971.
12. Боярская Ю.С. Закономерности деформирования кристаллов при неоднородном напряженном состоянии. Автореф. дисс...докт. физ.-мат. наук. АН УССР. Институт металлофизики, Киев, 1974.
13. Бродская Р.Л., Марин Ю.Б. Использование стереометрических методов в онтогенетическом анализе горных пород. — Зап. Всес. минерал. об-во, 1979, ч. 108, вып. 2, с. 141–153.
14. Вернон Р.Х. Метаморфические процессы. М.: Недра, 1980. 227 с.
15. Вишняков Д.Я., Бабарко А.А., Владимиров С.А., Эгиз И.В. Теория образования тектур в металлах и сплавах. М.: Наука, 1979.
16. Волярович М.П., Пархоменко Д.И. Пьезоэлектрический эффект горных пород. — Изв. АН СССР. Серия геофиз., 1955, № 8.
17. Галдин Н.В., Волярович М.П., Гусев К.Ф. Геолого-минералогическое и рентгенографическое изучение кварцевых тектонитов. — Зап. Всес. минерал. об-во, 1961, ч. 90, вып. 6, с. 660–672.
18. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975.
19. Глаголев А.А. Геометрические методы количественного анализа агрегатов под микроскопом. Львов: Госгеолиздат, 1941.
20. Головенко В.К. Опыт изучения ориентировки песчаных зерен в меловых отложениях Восточной Ферганы. — Вестн. ЛГУ, 1955, № 4.
21. Головин С.А., Пушкар А. Микропластичность и усталость металлов М.: Металлургия, 1980. 239 с.
22. Григорьев Д.П. Онтогенетия минералов. Львов: Изд-во Львов. ун-та, 1961.
23. Гроздинский Р., Костецкая А., Родомский А., Унруг Р. Седиментология. М.: Недра, 1980. 646 с.
24. Громин В.И. Малые структурные формы и палеореологические реконструкции. М.: Наука, 1970. 144 с.
25. Делицин И.С. Проявление структур будинажа в кварцитово-мраморных

толщах Юго-Западного Прибайкалья. — ДАН СССР, 1958, 120, № 5.

26. Делицин И.С. Пример совместного проявления ориентировки, соответствующей R-, B- и S-тектонитам. — Сов. геология, 1959, № 4.

27. Делицин И.С. Кварцево-пиррофилитовая толща Овручской свиты УССР и возможное проявление в ней структур будинажа. — Труды ИГЕМ АН СССР, 1961, вып. 48, с. 134—143.

28. Делицин И.С. Экспериментальные исследования по получению искусственного кварцевого тектонита. — В кн.: Автореф. сотрудников ИГЕМ АН СССР за 1961 г. М.: ИГЕМ АН СССР, 1962.

29. Делицин И.С. Опыт получения биметасоматической оторочки на контакте кварца с доломитом. — В кн.: Тр. VI конф. по экспериментальной и технич. минералогии и петрографии. М.: Изд-во АН СССР, 1962, с. 67—74.

30. Делицин И.С. Оптическая ориентировка искусственного кварцевого тектонита. — ДАН СССР, 1962, 146, № 4.

31. Делицин И.С., Петров В.П., Лившиц Л.Д. и др. Пластическая деформация кварца в лабораторных условиях. — В кн.: Автореф. работ сотрудн. ИГЕМ АН СССР за 1963 г. М.: ИГЕМ АН СССР, 1964.

32. Делицин И.С., Лившиц Л.Д., Марков В.К. и др. Пластическая деформация кварца в условиях высокой температуры и сверхвысокого давления. — В кн.: Исследование природного и технического минералообразования. М.: Наука, 1966.

33. Делицин И.С., Пархоменко Э.И., Силаева О.М. Связь структуры вещества с упругими и пьезоэлектрическими свойствами на примере изучения образца кварцевых тектонитов. — В кн.: Физико-механич. свойства горных пород верхней части земной коры. М.: Наука, 1968.

34. Делицин И.С. Электрическое взаимодействие зерен кварцевого агрегата и характер возникающей оптической ориентировки в условиях лабораторного опыта. — В кн.: Физико-механич. свойства горных пород верхней части земной коры. М.: Наука, 1968.

35. Делицин И.С. О генезисе удлиненной формы зерен кварца кварцевых песков. — В кн.: Автореф. работ сотрудников ИГЕМ АН СССР за 1967 г. М.: ИГЕМ АН СССР, 1968.

36. Делицин И.С., Силаева О.И.

Влияние контакта зерен кварцита на скорости продольных волн в горной породе. — Геофизика, 1973, № 10, с. 95—99.

37. Делицин И.С., Левушкин Л.Н. Дифрактометрическое изучение кварцевого S-тектонита из зоны интенсивной пластической деформации. — ДАН СССР, 1973, 208, № 2, с. 701—704.

38. Делицин И.С. Особенности пластической деформации кварца. — Изв. АН СССР, Серия геол., 1974, № 3, с. 72—82.

39. Делицин И.С., Майоров Н.А., Левушкин Л.Н., Зверев И.В. Ориентированное строение рекристаллизационных структур кварцита (по данным эксперимента). — ДАН СССР, 1974, 215, № 1.

40. Делицин И.С. О реальной и расчетной термодинамически устойчивой ориентировке кварца кварцита. — Изв. АН СССР. Серия геол., 1976, № 1, с. 109—124.

41. Делицин И.С. Структуры растворения под давлением в кварцитовидных песчаниках. — ДАН СССР, 1979, 248, № 2, с. 439—442.

42. Делицин И.С. Причины анизотропии вторичного роста зерен кварца в твердом агрегате. — ДАН СССР, 1979, 249, № 1, с. 172—175.

43. Делицин И.С. Стереометрическая характеристика пластической деформации мономинеральной кварцевой породы (на основе распределения двугранных углов). — ДАН СССР, 1979, 249, № 2.

44. Делицин И.С. Равновесная форма регенерированных зерен кварца и особенности гранобластовых структур, обусловленных регенерацией. — Изв. АН СССР. Серия геол., 1980, № 3, с. 57—71.

45. Джирл Уолкер. Почему слипаются влажные частицы песка и глины? — В мире науки, 1983, № 1.

46. Дистлер Г.И., Власов В.П., Герасимов Ю.М. и др. Декорирование поверхности твердых тел. М.: Наука, 1976.

47. Драник А.С. Тектоника и стратиграфия Словечано-Овручской возвышенности в северной части Украинского щита. — Геотектоника, 1968, № 3.

48. Дэна Дж., Дэна Э.С., Фрондель К. Система минералогии. Том III. Минералы кремнезема. М.: Мир, 1966.

49. Екобори Т. Физика и меха-

ника разрушения и прочности твердых тел. М.: Металлургия, 1971.

50. Елисеев Н.А. Основы структурной петрологии. Л.: Наука, 1967.

51. Жабин А.Г. Онтогенез минералов (агрегаты). М.: Наука, 1979, 275 с.

52. Жабин А.Г., Делицин И.С. Методика приближенно-количественного измерения формы зерен в агрегатах при решении генетических задач. — Геол. и геофиз., 1980, № 4.

53. Жуковский К.А. Пиррофилитов сланці УССР. Київ; Вид-во АН УРСР, 1937.

54. Забродин В.Ю. Системный анализ дизъюнктивов. М.: Наука, 1981, с. 198.

55. Залесский Б.В., Сазонова Э.А. Некоторые особенности структуры и физико-механических свойств артюшкинских песчаников. — В кн.: К семидесятилетию со дня рождения акад. Д.С. Белянкина, М.: Наука, 1966.

56. Импактиты (Ред. Маракушев А.А.). М.: Изд-во МГУ, 1981. 240 с.

57. Казанский В.И. Рудоносные тектонические структуры активизированных областей. М.: Недра, 1972.

58. Коржинский Д.С. Биметасоматические флогопитовые и лазуритовые месторождения архея Прибайкалья. — Труды ИГН АН СССР, 1947, вып. 29.

59. Корнфельд М.И. Что такое электризация трением? — ФТТ, 1969, 11, вып. 6, с. 1611–1616.

60. Кристи Дж.М., Эрдель А.Дж. Деформационные структуры в минералах. — В кн.: Электронная микроскопия в минералогии. М.: Мир, 1979. с. 363–391.

61. Круть И.В. Введение в общую теорию Земли: уровни организации геосистем. М.: Мысль, 1978. 367 с.

62. Кухаренко А.А. Ориентировка обломков в отложениях потоков. — Уч. зап. ЛГУ. Серия геол., 1953, вып. 3, № 159, с. 59–927.

63. Кэди У. Пьезоэлектричество и его практическое применение. М.: ИЛ, 1949. 719 с.

64. Лёв Л.Б. Статическая электризация. М.; Л.: Госэнергиздат, 1963.

65. Лившиц Л.Д., Прищепов В.Ф. Микронапряжения в поликристаллах анизотропных веществ при гидростатическом давлении. — Изв. АН СССР, Физика. Земли, 1977, № 6, с. 19–31.

66. Лукин Л.И., Чернышев В.Ф., Кушнарев И.П. Микроструктурный анализ. М.: Наука, 1965.

67. Мак Лин Д. Границы зерен в металлах. М.: Металлургиздат, 1960.

68. Мейен С.В. Принцип редукционизма в биологии. — В кн.: Диалектика развития в природе и научном понимании. Серия "Пробл. философии за рубежом". Подсерия СО, М.: ИНИОН АН СССР, 1978, с. 135–175.

69. Мейен С.В. Принцип исторических реконструкций в биологии. — В кн.: Системность и эволюция. М.: Наука, 1984, с. 7–32.

70. Минералы. Справочник, т. 2, вып. 2. Простые окислы. М.: Наука, 1965, с. 143–209.

71. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. М.: Физматиздат, 1961.

72. Олофинский Н.Ф. Электрические методы обогащения. М.: Госгортехиздат, 1962.

73. Остапенко Г.Т. Термодинамика негидростатических систем и ее применение в теории метаморфизма. Киев: Наукова думка, 1977, 239 с.

74. Петтиджон Ф., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники, М.: Мир, 1976.

75. Половинкина Ю.Ир., Викулова М.Ф., Разумовская Е.Э. и др. Структуры горных пород. Том II. Осадочные породы. М.; Л.: Госгеолиздат, 1948.

76. Половинкина Ю.Ир., Анисеева Н.Ф., Комарова А.Е. Структуры горных пород. Том III. Метаморфические породы. М.; Л.: Госгеолиздат, 1948.

77. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. М.: Металлургия, 1982. 584 с.

78. Пэк А.В. Трещинная тектоника и структурный анализ. М.: Изд-во АН СССР, 1939.

79. Румер Ю.Б., Рыбкин М.С. Роль математических методов в физике. — Вопросы философии, 1967, № 5.

80. Рутланд Р.У. Избыточное тектоническое давление. — В кн.: Природа метаморфизма. М.: Мир, 1967, с. 125–146.

81. Рябинин Ю.Н., Лившиц Л.Д. Поршневой пьезометр с квазигидростатической поддержкой на 100000 кг/см². — Ж. техн. физики, 1959, 29, № 9.

82. Рябинин Ю.Н., Петров В.П., Марков В.К., Лившиц Л.Д., Делицин И.С.

- Дальнейшие сведения об условиях образования плотных модификаций кремнезема при высоких давлениях и температурах. — Изв. АН СССР, серия геол., 1963, № 8, с. 3—11.
83. *Садовский М.А.* Естественная кусковатость горной породы. — ДАН СССР, 1980, 250, № 4, с. 846—848.
84. *Салтыков С.А.* Стереометрическая металлография (стереология металлических материалов). М.: Металлургия, 1976. 270 с.
85. *Сахарова М.С.* Метаморфические апатитоносные породы архея Южного Прибайкалья. — Труды ГИГХС, 1955, вып. 2.
86. *Силаева О.И., Делицин И.С.* Скорость продольных волн в кристалле искусственного кварца. — Изв. АН СССР. Физика Земли, 1970, № 2.
87. *Симанович И.М.* Кварц песчаных пород. М.: Наука. 1978. 153 с.
88. *Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П.* Основы кристаллофизики. М.: Наука, 1975, 639 с.
89. *Ситтер Л.У.* Структурная геология. М.: ИЛ, 1960.
90. *Соболев В.С.* Об условиях минералообразования при ориентированном давлении. — Минералог. сборн. (Львовское геол. об-во), 1957, № 1.
91. *Соболев В.С., Хлестов В.В., Кекежинская К.Б.* Об использовании ориентировки кварца для оценки температуры минералообразования. — ДАН СССР, 1964, 154, № 6.
92. *Старостин В.И., Дергачев А.Л.* Структурно-петрофизический анализ. — В кн.: Геологоструктурные методы изучения эндогенных рудных месторождений: М.: Недра, 1982.
93. *Тимченко И.П.* Протерозойские кварциты и кварцито-песчаники Центральной и Южной Карелии. — Труды ИГН АН СССР. Петрограф. серия, 1950, вып. 122, № 37.
94. *Уманский Я.С.* Рентгенография металлов и полупроводников. М.; Металлургия, 1969.
95. *Урманцев Ю.А.* Начало общей теории систем. — В кн.: Системный анализ и научное знание. М.: Наука, 1978.
96. *Файф У., Прайс Н., Томсон А.* Флюиды в земной коре. М.: Мир, 1981. 436 с.
97. *Ферберн Х.В.* Синтетический кварцит. — В кн.: Эксперим. исслед. в области петрографии и рудообразов., М.: ИЛ, 1954, с. 254.
98. *Флейшман Б.С.* Основы системологии. М.: Радио и связь, 1982.
99. *Хайрегодинов И.А.* Введение в электрогеохимию. М.: Наука, 1980.
100. *Холодов В.Н.* Новое в познание катагенеза. — Литология и полезные ископаемые, 1982, № 3.
101. *Цинзерлинг Е.В., Шубников А.В.* О пластичности кварца. — Труды Ломоносовского ин-та геохимии, кристаллографии и минералогии, сер. 67, 1938, вып. 3.
102. *Цинобер Л.И., Хаджи В.Е., Гордиенко Л.А., Литвин Л.Т.* Особенности роста кристаллов синтетического кварца. — В кн.: Рост кристаллов. Ереван: Изд. гос. ун-та, 1977, 12.
102. *Чернявский К.С.* Стереология в металловедении. М.: Металлургия, 1977. 279 с.
104. *Шаскольская М.П.* Кристаллография. М.: Высшая школа, 1976.
105. *Шаскольская М.П.* Рост и растворение пластически деформированных кристаллов каменной соли. — Уч. зап. МГУ. Физика. 1944, № 74, с. 37—56.
106. *Шафеев А.А.* Стратиграфия и метаморфизм докембрия Юго-Западного Прибайкалья. — ДАН СССР, 1964, 158, № 3.
107. *Штеренберг Л.Е.* Очерк геохимии северо-уральских марганцевых месторождений. — Труды ГИН АН СССР, 1963, вып. 97.
108. *Штремель М.А.* Лабораторный практикум по спецкурсу "Прочность сплавов". Часть 1. М.: Моск. Ин-т стали и сплавов, 1969.
109. *Шубников А.В.* Кварц и его изменение. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1940. 194 с.
110. *Шубников А.В.* Пьезоэлектрические текстуры. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1946.
111. *Шульце Г.* Металлофизика. М.: Мир, 1971.
112. *Щеколдин А.А., Базурин А.З., Реброва К.П.* К вопросу определения энантиоморфизма и ориентировки зерен кварца в кварцевых породах. — Зап. Всес. минерал. об-ва, 1969, ч. 98, вып. 1.
113. *Эбелинг В.* Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979.
114. *Юшкин Н.П., Асхабов А.М., Кунц А.Ф.* Регенерация деформированных кристаллов минералов (онтогенетические и кинетические аспекты). —

- В кн.: Геохимия, минералогия, петрология. М.: Наука, 1976, с. 241–250.
115. *Adams F.D., Nicholson J.F.* On an experimental investigation into the flow of marble. — *Philos. Trans. Roy. Soc. London A*, 1901, 195, N 384.
116. *Augustithis S.S.* On the phenomenology of plastic deformation of quartz and micas in some granites. — *Tectonophysics*, 1965, 2, N 6.
117. *Ave Zallement H.G., Carter N.L.* Pressure dependence of quartz deformation lamellae orientations. — *Amer. J. Sci.*, 1971, 270, N 3, p. 218–235.
118. *Basu A.R.* Textures, microstructures and deformation of ultramafic xenoliths from San Quintin, Baja California. — *Tectonophysics*, 1977, 43, N 3–4, p. 213–246.
119. *Brace W.F.* Orientation of anisotropic minerals in stress field: Discussion. — *Mem. Geol. Soc. Amer.*, 1960, 79.
120. *Bunch T.E.* Some characteristics of selected minerals from craters. — In: *Shock metamorphism of natural materials*. Baltimore, 1968, p. 413–432.
121. *Carter N.Z., Christie J.M., Griggs D.T.* Experimentally produced deformation lamellae and other structures in quartz sand (Abstr.). — *J. Geophys. Res.*, 1961, p. 2518–2519.
122. *Carter N.Z., Christie J.M., Griggs D.T.* Experimental deformation and recrystallization of quartz. — *J. Geol.*, 1964, 72, N 6, p. 687–733.
123. *Carter N.Z., Friedman M.* Dynamic analysis of deformed quartz and calcite from the dry creek ridge anticline, Montana. — *Amer. J. Sci.*, 1965, 263, N 9, p. 747–785.
124. *Carter N.Z.* Basal quartz deformation lamellae — a criterion for recognition of impactites. — *Amer. J. Sci.*, 1965, 263, N 9, p. 786–806.
125. *Christie J.M., Raleigh C.B.* The origin of deformation lamellae in quartz. — *Amer. J. Sci.*, 1959, 257, p. 385–407.
126. *De Vore G.W.* Differential thermal contractions and compressibilities as a cause for mineral fracturing and annealing. — *Contribs. Geol.*, 1969, 8, N 1, p. 21–36.
127. *De Vore G.W.* Elastic compliances of minerals related to crystallographic orientation and elastic strain energy relations in twinned crystals. — *Lithos*, 1970, 3, N 3.
128. *Engelhardt W., Bertsch W.* Shock induced planar deformation structures in quartz from the Ries crater, Germany. — *Contribs. Miner. and Petrol.*, 1969, 20, N 3, p. 203–234.
129. *Ernst W.G., Blatt H.* Experimental study of quartz overgrowths and synthetic quartzites. — *J. Geol.*, 1964, 72, N 4, p. 461–476.
130. *Fordham S.* The relative rates of growth of strained and unstrained ammonium nitrate crystals. — *Discuss. Faraday Soc.*, 1949, N 5, p. 117–119.
131. *Friedman M.* Residual elastic strain in rocks. — *Tectonophysics*, 1972, N 15, p. 297–330.
132. *Gold D.P.* A study of quartz subgrains from the Brent Crater, Ontario. — In: *Shock metamorphism of natural materials*. Baltimore, 1968, p. 495–508.
133. *Hansen E., Borg I.Y.* The dynamic significance of deformation lamellae in quartz of a calcite-cemented sandstone. — *Amer. J. Sci.*, 1962, 260, p. 321–336.
134. *Harker D., Parker E.* Grain shape and grain growth. — *Trans. ASM*, 1945, 34, p. 156–195.
135. *Harper W.R.* Adhesion and charging of quartz surfaces. — *Proc. Roy. Soc. London A*, 1955, 231, N 1186, p. 388–403.
136. *Harris G.W.* Quantitative measurement in preferred orientation in rolled uranium bars. — *Philos. Mag.*, 1952, 43, N 336.
137. *Heald M.T., Renton J.J.* Experimental study of sandstone cementation. — *J. Sediment. Petrol.*, 1966, 36, N 4, p. 977–991.
138. *Heard H.C.* Effect of large changes in strain-rate in the experimental deformation of Yule marble. — *J. Geol.*, 1963, 71, p. 162–195.
139. *Hobbs B.E.* Recrystallization of single crystals of quartz. — *Tectonophysics*, 1968, 6, p. 353–401.
140. *Hörr F.* Statistical measurements of deformation structures and refractive indices in experimentally shock loaded quartz. — In: *Shock metamorphism of natural materials*. Baltimore, 1968, p. 243–254.
141. *Ingerson E., Ramisch J.* Origin of shapes of quartz sand grains. — *Amer. Miner.*, 1942, 27, N 9, p. 595–606.
142. *Kamb W.B.* Author's reply to discussion of the paper "The thermodynamic theory of nonhydrostatically stressed solids". — *J. Geophys. Res.*, 1961, 66, N 11.
143. *Levin L., Prewitt C.T., Weidner D.J.* Structure and elastic properties

of quartz at pressure. — Amer. Miner., 1980, 65, N 9–10, p. 920–930.

144. *Lister G.S., Paterson M.C., Hobbo B.E.* The simulation of fabric development in plastic deformation and its application to quartzite: the model. — Tectonophysics, 1978, N 2–3, p. 107–158.

145. *MacDonald G.J.F.* Orientation of anisotropic minerals in stress fields. — Mem. Geol. Soc. Amer., 1960, 79, N 1.

146. *Mao H.K., England J.Z.* A discussion of pressure distribution in modern solid-pressure media apparatus. — Carnegie Inst. Wash. Yb., 1971, N 70, p. 111–124.

147. *Moss A.J.* Origin, shaping and significance of quartz sand grain. — J. Geol., Soc. Austral., 1966, 13, N 1.

148. *Moss A.J., Walker P.H., Hutka J.* Fragmentation of granitic quartz in water. — Sedimentology, 1973, 20, N 4, p. 489–511.

149. Quantitative microscopy. N.Y.: McGraw Hill, 1968.

150. *Ransom D.M.* Host control of recrystallized quartz grains. — Miner. Mag., 1971, 38, p. 83–88.

151. *Rowland R.A.* Grain-shape fabrics and clastic quartz. — Bull. Geol. Soc. Amer., 1964, 57, N 6, p. 547–564.

152. *Rutter E.H.* The kinetics of rock deformation by pressure solution. — Philos. Trans. Roy. Soc. London A, 1976, 283, p. 203–213.

153. *Sander B.* Gefügekunde der Gesteine. Vienna: Springer, 1930.

154. *Short N.M.* Anatomy of meteorite impact crater, West Lake Manitoba, Canada. — Bull. Geol. Soc. Amer., 1970, 81, N 3.

155. *Skolnick H.* The quartzite problem. — J. Sediment Petrol., 1965, p. 12–21.

156. *Smith C.S.* Some elementary prin-

ciples of polycrystalline microstructure. — Met. Revs, 1964, 9, N 33, p. 98–109.

157. *Sonder R.A.* Gefügeregelung, Druckschieferung und Druckverformung von Gesteinen. — Schweiz. miner. and petrogr. Mitt, 1948, 28, S. 362.

158. *Spang J.H., Van der Lee J.* Numerical dynamic analysis of quartz deformation lamellae and calcite and dolomite twin lamellae. — Bull. Geol. Soc. Amer., 1975, 86, N 9, p. 1266–1272.

159. *Spry A.* Metamorphic textures. Pergamon press, 1976.

160. *Tullis J., Christie J.M., Griggs D.T.* Microstructures and preferred orientations of experimentally deformed quartzites. — Bull. Geol. Soc. Amer., 1973, 84, N 1, p. 297–314.

161. *Turner F.J., Weiss L.W.* Structural analysis of metamorphic tectonites. N.Y., 1963.

162. *Twiss R.J.* Some planar deformation features, slip systems and submicroscopic structures in synthetic. — J. Geol., 1976, 84, N 6, p. 701–724.

163. *Wayland R.W.* Optical orientation in elongate clastic quartz. — Amer. J. Sci., 1939, 237, N 2, p. 99–109.

164. *Wernick E., Castro P.R.M.* Contribuicao ao estudo de graose de quartzo alongados do arenito Botucata. — Notic. geomorfol., 1971, 11, N 22.

165. *Wernick E., De Almeida F.N.* Controle de ruptura em graos de quartzo detriticos. — Notic. geomorfol., 1972, 12, N 23, p. 63–68.

166. *Yoder H.S.* High-low quartz inversion up to 10 000 bars. — Trans. Amer. Geophys. Union., 1950, 31.

167. *Zirkel F.* Lehrbuch der Petrographie. 11. Aufl. 1893. 196 S.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	7
Методика исследования	16
Общие сведения о кварце	22
Часть первая	
Структуры рыхлых кварцевых пород и закономерности их изменения в условиях эпигенеза	28
Экспериментальное изучение причин возникновения седиментационных структур	28
Существующие представления об ориентировке зерен кварца в осадочных породах	28
О связи между удлиненной формой зерен обломочного кварца и его оптической осью	32
Ориентированное строение песка, полученного в условиях опыта	41
Влияние электрического поля на ориентировку агрегата зерен кварца	51
Ориентировка агрегата зерен кварца в водной среде	54
Седиментационные структуры природных кварцевых песков	57
Особенности генезиса структур рыхлых осадочных пород	63
Структурные особенности литифицированных кварцевых пород	64
Структуры пород, связанных с процессами цементации	64
Особенности формирования структур кварцитовидных песчаников	65
Обсуждение результатов	84
Часть вторая	
Структурные преобразования кварцевых пород в условиях метаморфизма	86
О соотношении деформационных и рекристаллизационных структур метаморфизованных кварцевых пород	87
Результаты полевых исследований	87
Результаты эксперимента	91
Деформационные структуры метаморфизованных кварцевых пород	96
Экспериментальное изучение причин развития деформационных структур кварцевых пород	97
Деформационные структуры природных объектов	117
Термодинамически устойчивая ориентировка кварца и кварцита	135
Пластическая деформация кварцевой породы в условиях метаморфизма	138
Рекристаллизационные структуры кварцевых пород	140
Экспериментальное уточнение причин, контролирующих становление рекристаллизационных структур	141
Особенности природных гранобластовых структур, обусловленных рекристаллизацией, в свете результатов проведенных опытов	147
Основные закономерности развития рекристаллизационных структур кварцевых пород	158

Обсуждение результатов	162
Систематика структурных признаков	162
Закономерности изменения пространственного строения кварцевой породы	164
О формоизменении индивида в агрегате и структурообразовании агрегата	165
Поведение геологических объектов в изменяющихся внешних условиях	175
Сопоставление некоторых особенностей эволюции геологических и биологических объектов	178
О принципе структурности	180
Заключение	181
Литература	184

Игорь Сергеевич Делицин
СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ
КВАРЦЕВЫХ ПОРОД

*Утверждено к печати
Институтом геологии рудных месторождений,
петрографии, минералогии и геохимии АН СССР*

Редактор издательства А.И. Жилина
Художник Э.П. Дорохова
Художественный редактор М.Л. Храмцов
Технический редактор Н.А. Торгашова
Корректор О.А. Пахомова

Набор выполнен в издательстве
на наборно-печатающих автоматах

ИБ № 29229

Подписано к печати 21.06.85. Т – 00984
Формат 60 × 90 1/16. Бумага офсетная № 1
Гарнитура Пресс-Роман. Печать офсетная
Усл. печ. л. 12,0 + 1,1 вкл. Усл. кр.-отт. 13,3
Уч.-издл. 15,7. Тираж 650 экз.
Тип. зак. 452. Цена 2 р. 40 к.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство "Наука"
117864 ГСП-7, Москва В-485,
Профсоюзная ул., д. 90

Ордена Трудового Красного Знамени
1-я типография издательства "Наука"
199034, Ленинград В-34, 9-я линия, 12

2р. 40 к.

4409