

УДК 621.039.5; 550.837

## НЕЙТРОНОГРАФИЯ В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ

*А. Н. Никитин, Т. И. Иванкина*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	349
ТЕКСТУРЫ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКИЙ ТЕКСТУРНЫЙ АНАЛИЗ	350
СВЯЗЬ МЕЖДУ ТЕКСТУРАМИ И ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ГОРНЫХ ПОРОД И МЕТЕОРИТОВ	366
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ О ТЕКСТУРАХ ГОРНЫХ ПО- РОД ПРИ РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ	385
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	401
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	403

УДК 621.039.5; 550.837

## НЕЙТРОНОГРАФИЯ В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ

*А. Н. Никитин, Т. И. Иванкина*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В обзоре подробно анализируются принципиальные преимущества нейтронных методов, основанных на феноменальных свойствах нейтрона, позволяющие расширить круг решаемых проблем физики твердого тела, геологии и геофизики. Изложены основы нейтронографического текстурного анализа поликристаллических материалов и горных пород в частности. Дано определение кристаллографических текстур, упор сделан на то обстоятельство, что преимущественная ориентировка кристаллических решеток породообразующих минералов (один из основных факторов, контролирующая анизотропию горных пород) является унаследованным свойством, приобретенным в результате магматизма, метаморфизма, пластического течения горных пород и других процессов, определивших формирование литосферы Земли. В основной части обзора приведены новые результаты изучения особенностей текстурного строения горных пород и обусловленных ими физических свойств, например, анизотропии скоростей упругих волн при высоких гидростатических давлениях, пьезоэлектрических свойств некоторых горных пород, а также магнитных и тепловых свойств. Показаны примеры применения данных нейтронографии в комплексе с другими физическими и петрофизическими методами для решения фундаментальных проблем геологии и геофизики, таких как реконструкция палеотектонических деформаций и напряжений в блоках литосферы и изучение метаморфических, геодинамических и эволюционных процессов по данным о текстурах глубинных образцов (ксенолитов, амфиболитов и гнейсов сверхглубоких скважин). Приводятся данные нейтронных измерений остаточных и внутренних механических напряжений в разных горных породах в свободном состоянии и под действием различных механических нагрузок. Обсуждаются результаты исследования аномальных свойств некоторых горных пород, проявляющихся при повышенных температурах и давлениях, и их возможное применение для физики разрушения и для развития моделей очагов землетрясений. Оценивается состояние экспериментальной базы и современные тенденции развития исследований геоматериалов методами нейтронографии с целью решения актуальных фундаментальных и прикладных задач, стоящих перед науками о Земле.

The principle advantages of neutron diffraction based on phenomenal properties of a neutron which permit to extend a range of solid-state physics problem are analyzed in the review in detail. The fundamentals of neutron diffraction texture analysis of polycrystalline materials and rocks in particular are presented. The term of crystallographic texture is defined indenting the lattice preferred orientation of rock-forming minerals as a main factor which controls the anisotropy of rocks and as an inherited property gained during plastic flow of rocks or during magmatic, metamorphic and other processes which determine the formation of lithosphere of the Earth. The basic part of the review contains new results of study of texture regularities of rocks and physical property peculiarities caused by them, for example, the behavior of elastic wave velocity at high hydrostatic pressures, the investigation of piezoelectric properties of rocks as well as magnetic and thermal properties. Applications of neutron diffraction data in complex with different physical and petrophysical methods to fundamental problems of geology and geophysics are demonstrated, such as the reconstruction of paleotectonic strains and stresses within the lithosphere block and the study of metamorphic, geodynamic and evolution processes on the basis of data on textures of deep samples (xenoliths, amphibolites and gneisses from the superdeep borehole). Neutron diffraction data of residual and intracrystalline

stresses on different rocks at normal conditions and under mechanical loading are shown. Results of study of anonymous rock properties appeared at high temperatures and high pressures and their possible applications to physics of failure and to development of model of earthquake source are discussed. The state of experimental base and modern tendencies of development of rock material investigations using neutron diffraction for solving of actual fundamental and applied problems in geosciences are appreciated.

## ВВЕДЕНИЕ

Исследования различных видов рассеяния нейтронов в конденсированных средах с целью изучения строения последних называют общим термином «нейтронография» [1, 2]. Задачи, решаемые методами нейтронографии, во многом аналогичны тем, которые решаются с помощью хорошо развитой и более доступной рентгенографии. Однако использование нейтронов несет и совершенно новые возможности, порой уникальные и недоступные для рентгеновских лучей. Принципиальные преимущества нейтронных методов, основанных на феноменальных свойствах нейтрона, позволяют расширить круг решаемых проблем физики конденсированного состояния. Длина волны тепловых нейтронов соответствует типичным межатомным расстояниям в твердых телах. Это свойство нейтронов дает возможность исследовать структуру и текстуру твердых тел, минералов и минеральных ассоциаций и их изменений под влиянием внешних воздействий.

Хорошо известны успехи, достигнутые в структурной и магнитной нейтронографии, нейтронной спектроскопии и рефлектометрии. Использование рассеянных нейтронов обеспечило решение многих фундаментальных и прикладных задач в физике конденсированного состояния вещества, химии, биологии, медицине, материаловедении и науках о Земле [3].

В последнее десятилетие произошел выход на новый уровень нейтронографического текстурного анализа, применяемого в комплексе с другими физическими методами в отношении исследования свойств геологических материалов с целью решения фундаментальных задач геологии и геофизики [4].

В предлагаемом обзоре рассмотрены основные достижения в науках о Земле, при решении которых применяются методы нейтронографии. К наиболее актуальным проблемам и задачам можно отнести следующие:

1. Изучение происхождения, эволюции, состава, структуры, свойств вещества литосферы при различных термодинамических параметрах.
2. Изучение процессов и физических механизмов упорядочения минеральных ассоциаций в геоматериалах и их связь с эволюционными этапами литосферы.
3. Исследование связи кристаллографических текстур и текстур формы с физическими (упругими, пьезоэлектрическими, магнитными, тепловыми

и др.) свойствами горных пород при различных термодинамических параметрах.

4. Исследование структуры, текстуры и свойств метеоритного вещества.

5. Нейтронографические исследования структуры и полиморфных превращений в минералах и планетарных льдах, а также поиски аномального поведения физических свойств в минералах и породах при воздействии высоких температур и давлений.

6. Изучение метаморфических, геодинамических и эволюционных процессов в литосфере по данным о текстурах (в комплексе с другими данными) глубинных и приповерхностных горных пород.

7. Развитие теории и методики реконструкции палеотектонических деформаций и напряжений по данным о кристаллографических текстурах (в комплексе с компьютерным моделированием и данными о сейсмической анизотропии в блоках литосферы и компьютерным моделированием текстуробразования).

8. Нейтронографические исследования локальных, остаточных и решеточных деформаций и напряжений как при нормальных условиях, так и при повышенных температурах и внешних нагрузках с точки зрения развития физики очага землетрясения.

## 1. ТЕКСТУРЫ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКИЙ ТЕКСТУРНЫЙ АНАЛИЗ

**1.1. Кристаллографические текстуры и текстуры формы горных пород.** В геологии широко распространен термин «текстура». Такой же термин встречается в металлофизике и материаловедении. Геологи традиционно понимают под текстурами широкий класс земных образований, например, упорядоченные различным образом геологические объекты разного масштаба и упорядоченные неоднородности, обладающие какими-либо элементами симметрии.

В масштабе зерен минералов, образующих горные породы, можно выделить два основных типа текстур: кристаллографическая текстура и механическая текстура (или текстура формы).

**Кристаллографическая текстура.** Под кристаллографической текстурой понимают преимущественную ориентировку кристаллических решеток монокристаллов (зерен), образующих поликристаллический материал. Горные породы представляют собой одно- или многофазные поликристаллические агрегаты, предпочтительные ориентировки зерен у которых образуются в процессе кристаллизации, пластической деформации, рекристаллизации, ползучести, фазовых переходов, осадконакопления и т. п. [5].

*Текстура кристаллизации.* В процессе кристаллизации вещества из расплава или раствора под влиянием градиентов температур и давлений в объеме материала растущие зерна приобретают преимущественную ориентировку. Тип текстуры, возникающей при кристаллизации, обусловлен законами геометрического и кристаллографического отбора. Кристаллографический отбор приводит поликристалл к состоянию с минимальной внутренней энергией в процессе преимущественного роста нормально к кристаллографическим плоскостям с наиболее плотной упаковкой атомов. При геометрическом отборе образование текстуры определяется преимущественной ориентировкой зародышей в объеме субстрата и кристаллографическим направлением с максимальной скоростью роста.

*Текстура деформации.* При пластической деформации поликристаллических материалов за счет внутрикристаллического дислокационного скольжения [6–8] происходит образование и развитие предпочтительных ориентировок кристаллитов [5, 9]. Если поликристалл с хаотической ориентировкой составляющих зерен деформируется путем скольжения внутри каждого зерна так, что на границах не возникают разрывы, то изменение формы любого зерна должно согласовываться с изменением форм соседних зерен и формы всего тела как целого. Если у зерна есть, как минимум, пять независимых систем скольжения, то это зерно при деформации может претерпеть общее формоизменение. Этому условию (условие Мизеса) должны подчиняться все зерна, чтобы поликристалл был способен к большим пластическим изменениям формы. В процессе деформации поликристалла путем скольжения индивидуальные зерна стеснены своими соседями и в них происходят различные повороты кристаллических решеток. Относительную роль вращения решетки можно оценить, если предположить, что каждое зерно поликристалла испытывает одинаково малую деформацию, так что деформация всего тела как целого однородна. Ротационная составляющая пластической деформации каждого зерна физически обуславливает появление зерен в объеме поликристалла с близкими ориентациями.

*Текстура рекристаллизации.* К числу разнообразных метаморфических реакций следует отнести рекристаллизацию как физический процесс, приводящий к изменениям структуры и текстуры горных пород на разных стадиях эволюции. Формирование и изменение текстур рекристаллизации происходит при нагреве или охлаждении деформированного геоматериала (или в процессе деформации) и связано с изменениями, приводящими к замене исходных зерен с искаженной решеткой новыми, с более совершенной структурой. При этом иногда может изменяться минеральный состав, а структура оставаться прежней, или, наоборот, при неизменном минеральном составе меняются размеры, форма и ориентировка кристаллитов. Различают первичную, собирательную, вторичную и динамическую рекристаллизацию [9–11].

Комбинация действующих рекристаллизационных механизмов зависит от большого числа параметров, включая давление, температуру, скорость деформации, тип деформирования, размеры зерен и содержание флюида. Правильное установление механизма рекристаллизации с помощью исследования структуры и текстуры деформированных горных пород является существенной частью определения их деформационной истории [12].

**Текстура формы.** Под текстурой формы понимают наличие согласованно ориентированных составных частей, обладающих анизотропией внешней формы.

В металлах, например, механические текстуры образуются кристаллитами, имеющими вытянутую или волокнистую форму [10, 13]. В горных породах в масштабе минеральных зерен текстура формы создается зернами с вытянутой формой, параллельной слоистостью, полосчатостью минеральных ассоциаций, ориентированной трещиноватостью и микротрещиноватостью, плоскими и игольчатыми дефектами, ориентированными вытянутыми межзерновыми границами [11, 14, 15]. От концентрации и конфигурации пор зависит величина анизотропии свойств твердых тел и горных пород в частности. При всем разнообразии в горных породах основными являются два вида пор [16]:

- объемные поры, имеющие размеры одного порядка во всех направлениях;
- щелевидные поры (а также микротрещины), у которых размер в одном направлении, как минимум, на порядок больше, чем в других.

Экспериментальные наблюдения показали существование в образцах горных пород упорядоченных систем сфероидальных и иглообразных микротрещин [17, 18].

Наблюдаемые в природе системы трещин отличаются большой сложностью и разнообразием. В любом реальном материале имеются трещины самых разных форм и ориентировок. В этих условиях даже при простом сжатии на концах некоторых трещин развиваются растягивающие напряжения. Такие (индуцированные) растягивающие напряжения обуславливают рост благоприятно ориентированных трещин и их предпочтительную ориентировку.

Различные текстурные особенности в континентальной коре подтверждают, что один из важнейших типов механического поведения, проявившийся в горных породах, особенно в складчатых областях, — это связанное течение в твердом состоянии. Некоторые из таких наблюдавшихся в природе текстур очень похожи на текстуры, получаемые при экспериментальном моделировании деформаций. Горные породы обладают способностью к связанному течению, по-видимому, при любой комбинации физических условий, возникающих в литосфере.

С развитием методов теории упругости микронеоднородных анизотропных сред, опирающейся на теорию случайных полей, стали появляться более

сложные модели, описывающие текстуры формы. Р.Л.Салгаником [19] теоретически в рамках механики неоднородной сплошной среды рассмотрена задача об определении эффективных характеристик тела с текстурой формы, в которой учитывается влияние напряженно-деформированного состояния на развитие трещин. Уделено внимание формулировке и общему анализу кинетического уравнения для функции распределения в конфигурационном пространстве переменных, задающих форму, расположение и ориентацию трещин [20].

Задача о связи случайно распределенных трещин с эффективными параметрами упругой среды была рассмотрена в работе [21].

Положив в основу известный подход Эшелби для решения задачи об уединенном эллипсоидальном включении в безграничной матрице и свойство обобщенного сингулярного приближения (ОСП), авторы [22] рассмотрели задачу об определении упругой анизотропии среды с ориентированной системой трещин произвольной формы и концентрации. Чуть раньше [23] была предложена модель образования текстур формы в кварцсодержащей горной породе. Эта модель, во-первых, учитывала влияние термически инициированного полиморфного превращения на процесс перехода среды из изотропного состояния в анизотропное, а во-вторых, допускала сосуществование в объеме материала одновременно трех компонент кварца с различными аномальными свойствами. Было показано, что в результате воздействия неравноосных механических напряжений в зонах микропластичности, образующихся благодаря протекающему микроструктурному фазовому переходу, появляются микроструктурные элементы эллипсоидальной формы, ориентирующиеся параллельно большим осям, что переводит материал в анизотропное состояние.

В настоящее время в геофизике сложилось представление о том, что кристаллографическая текстура и текстура формы являются одними из основных факторов, контролирующих анизотропию горных пород [11, 24–26]. Причем контрастность анизотропии находится в зависимости от степени упорядоченности кристаллитов, составляющих поликристаллический агрегат. Влияние кристаллографической текстуры на анизотропию физических свойств тем больше, чем ниже симметрия образующих материал кристаллов и чем контрастнее их собственная анизотропия. Наиболее чувствительны к текстуре упругие свойства материалов (в первую очередь, упругие постоянные) и магнитные свойства ферромагнетиков. Текстуры материалов, образованных кристаллитами с некубической решеткой, обуславливают проявление анизотропии теплопроводности, термического расширения, электропроводности и других характеристик.

**1.2. Изучение текстур горных пород оптическим, электронографическим, рентгеновским методами. Оптический метод измерения преимущественных ориентировок зерен в горных породах.** Уже в начале XX в. для изучения предпочтительных ориентировок минералов в горных поро-

дах стали применять оптические методы. Очевидным недостатком оптических методов является то, что полезная информация ограничивается сведениями об ориентировках только оптических осей зерен вблизи поверхности шлифа.

К основным оптическим методам измерения преимущественных ориентировок относятся метод максимального блеска, универсальный метод и фотометрический метод.

*Метод максимального блеска* основан на различной скорости травления разных кристаллографических плоскостей. Об ориентировке отдельных зерен поликристаллического материала судят, анализируя углы отражения светового пучка известными (обнаруженными травлением) гранями (hkl), либо форму и расположение ямок травления с помощью электронного микроскопа или оптического гониометра.

*Фотометрический метод* использует явление интерференции поляризованных лучей света при прохождении через кристалл. Цвета кристалла меняются при повороте его относительно поляризатора и анализатора поляризационного микроскопа.

Метод компьютерно-интегрированной поляризационной микроскопии комбинирует метод Прайса [27] с современными методами, создающими изображение [28]. Наблюдая тонкие шлифы минералов под микроскопом между скрещенными поляризаторами с вставленной  $\lambda$ -пластинкой из гипса, можно видеть картины интерференционных полос. Различные зерна имеют различные цвета, зависящие от свойств двойного лучепреломления минерала, ориентировки оптической  $c$ -оси и толщины шлифа. Вследствие симметрии кристалла связь между цветом и ориентировкой не является однозначной. Для получения дополнительной информации об ориентировке зерна на практике обычно поворачивают столик микроскопа. Для любого заданного начального положения устанавливают последовательность цветов. Далее, угол поворота, необходимый для совпадения с красным цветом первого порядка, задает азимутальный угол  $\varphi$ , а интенсивность цветового контраста между желтой и голубой областями определяет угол наклона  $\Theta$ . Проблема определения знака решается путем наклона шлифа относительно столика микроскопа. Таким образом, ориентировку  $c$ -оси определяют однозначно.

*Универсальный метод.* Изложенные выше методы исследования оптических свойств кристаллов разработаны применительно к поляризационному микроскопу со столиком, вращающимся вокруг одной оси — оси микроскопа.

Е. С. Федоров в конце XIX в. разработал принципиально новый метод, названный им универсальным, или теодолитным [29]. Исследование кристаллов этим методом производится на особом, универсальном (федоровском) столике, который привинчивается на обычный столик поляризационного микроскопа. Федоровский столик имеет несколько осей, позволяющих выводить



препарат из положения, перпендикулярного к оси микроскопа, и вращать его в различных направлениях в пространстве.

Измерение ориентаций зерен в горных породах на универсальном столике оптического микроскопа основано на анизотропии оптических свойств кристаллов. Свойства зависят от симметрии кристалла и могут быть описаны оптической индикатрисой с главными осями  $n_\alpha$ ,  $n_\beta$ ,  $n_\gamma$ .

Кристаллы с тригональной, тетрагональной и гексагональной симметрией оптически одноосны, причем оптическая ось ( $c$ -ось) совпадает с главной осью симметрии кристалла. В одноосных минералах (например, кварц, кальцит)  $c$ -ось является единственным «оптическим» направлением, которое может быть измерено. Для получения полной ориентировки в дополнение к  $c$ -оси должны быть определены два или более кристаллографических направления. В случае с кварцем это невозможно сделать оптическим методом.

Кристаллы с триклинной, моноклинной и орторомбической сингонией обладают двумя оптическими осями. Ориентировка оптической индикатрисы относительно кристаллографических осей более сложная, чем в одноосном случае. Она зависит от симметрии кристалла и химического состава минеральной фазы. В орторомбических минералах (например, оливин) направления осей оптической индикатрисы параллельны главным кристаллографическим направлениям, и, следовательно, из измерений индикатрис непосредственно может быть определена полная ориентировка.

В моноклинных минералах (например, роговая обманка) ось индикатрисы отклоняется от кристаллографической  $c$ -оси на различный угол в зависимости от состава рассматриваемого минерала, и поэтому для однозначного определения ориентировки кристалла требуется дополнительная информация. Для триклинных минералов, подобных плагиоклазу, из индикатрисы непосредственно не может быть определено ни одно из главных кристаллографических направлений. Относительные положения осей индикатрисы изменяются в зависимости от минерального состава [30, 31]. Поэтому для определения полной ориентировки низкосимметричных минералов в дополнение к осям индикатрисы должна быть измерена ориентировка как минимум одной кристаллографической плоскости.

Методика определения преимущественных ориентировок минералов в образцах горных пород была разработана Зандером [32].

**Электроннографический метод.** Использование сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) для определения преимущественной ориентировки зерен является достаточно новым и потому не столь широко распространенным. Различают методы электронного сканирования (ЭС) и электронной дифракции обратного рассеяния (ЭДОР). Детально основы метода СЭМ изложены в [33].

В результате электронного сканирования получают определенную конфигурацию линий и полос, характеризующих ориентировку кристаллита в

точке падения электронного пучка. Сам метод ЭС основан на том [34], что при попадании электронов падающего пучка между кристаллографическими плоскостями решетки возникает небольшая доля электронов, рассеянных в обратном направлении. Для получения четкого сигнала эмиссии угол наклона электронного пучка к плоскостям должен изменяться при сканировании на  $2\Theta$  для каждого определенного ряда межатомных плоскостей, участвующих в отражении. Более того, пучок должен быть коллимирован, так как изменения в сигнале эмиссии наблюдаются только в том случае, когда большая часть электронов перемещается в одном направлении. Регистрируемая в электронографе или под электронным микроскопом дифракционная картина является точечной дифракционной картиной, которую можно рассматривать как практически неискаженную проекцию плоскости обратной решетки.

Картины электронного обратного сканирования (картины Кикучи) создают геометрически эквивалентные изображения. Картины ЭДОР возникают, когда стационарный пучок падает на наклонный образец под небольшими углами падения ( $\sim 10\text{--}30^\circ$ ). Оптимальное пространственное разрешение метода ЭДОР составляет  $0,1\text{--}1,5$  мкм, что превосходит метод ЭС ( $1\text{--}10$  мкм), однако в этом случае образец находится под наклоном, что приводит к анизотропии разрешения.

Анализ картин электронного сканирования основан на сравнении картины, полученной на образце, с так называемыми «КЭС-картами», скомпонованными из отдельных картин электронного сканирования. Сравнение картин может быть выполнено визуально, на практике же индексирование и построение структурных диаграмм для каждого кристаллического направления осуществляется с помощью компьютера [35].

Метод ориентационно изображающей микроскопии (ОИМ) [36] осуществляет автоматизированный анализ картин электронной дифракции обратного рассеяния. Образец фиксируется на столике микроскопа для двухмерного позиционирования. Картина ЭДОР наблюдается на экране с помощью видеокамеры высокого разрешения, фиксируется компьютером, и ориентировка кристалла определяется автоматически. При анализе образца столик перемещается в новое положение и регистрируется картина от другого зерна. Таким способом поверхность образца сканируется на регулярной сетке с выбранным размером шага. Возможная скорость составляет около 3000 измерений в час, что позволяет в короткое время получить статистически достоверные данные. К настоящему времени метод ОИМ ограничен только однофазными материалами.

**Рентгеновский метод.** Измерение полюсных фигур (ПФ) с помощью рентгеновских лучей основано на дифракции, которая возникает при рассеянии излучения данного диапазона на атомах кристаллической решетки.

Проведение рентгеновского эксперимента осуществляется следующим образом. Образец помещается в центре окружности гониометра. Первичный пу-

чок падает на образец под углом  $\Theta$ , отраженный может наблюдаться под углом  $2\Theta$  по отношению к падающему пучку. Это условие выполняется, если окружность фокусировки пересекает окружность гониометра в положениях коллиматора и приемной щели и одновременно касается поверхности образца. Вектор рассеяния соответствует нормали к плоскости решетки (hkl), которая находится в отражающем положении.

При выполнении измерений полюсных фигур угол  $\Theta$  принимает значения в соответствии с законом Брэгга для искомого отражения (hkl) и сохраняется постоянным.

Позиционирование образца выполняется с помощью эйлеровской рамы путем вращения образца вокруг двух перпендикулярных осей. Различают два режима рентгеновского эксперимента:

1) режим обратного отражения (рассеянный пучок наблюдается на той же стороне образца);

2) режим пропускания (рассеянный пучок проходит через образец).

Преимущества и недостатки любой рентгеновской методики состоят в следующем. Текстура поликристаллического материала является статистическим ансамблем кристаллитов, и необходимо статистически представительное число кристаллитов или зерен, чтобы получить достоверную информацию от образца. Для получения воспроизводимых полюсных фигур необходимо от  $10^4$  до  $10^5$  зерен. Известные свойства рентгеновских лучей, а именно сильное поглощение в материале и небольшой диаметр пучка, ограничивают их использование небольшими и тонкими образцами, а также мелкозернистыми материалами с размером зерна менее 20 мкм.

Эти ограничения метода позволяют исследовать только поверхность образца, поскольку рентгеновские лучи поглощаются на глубине от десятков до сотен микрометров. Рентгеновские лучи измеряют локальную текстуру на поверхности образца. Вследствие высокой и ориентационно-зависимой абсорбции и ограничений из-за дефокусировки (уширения пиков вследствие различных поперечных сечений отраженного пучка) брэгговских рефлексов, когда имеется наклон плоского образца, можно получить только неполные полюсные фигуры. Этот недостаток может быть частично преодолен с помощью точной сканирующей техники, т. е. комбинированием геометрии на прохождение и на отражение, а также уточненным анализом данных. Обычно рентгеновская дифракция применяется к анализу мономинеральных геоматериалов с орторомбической или более высокой кристаллической симметрией.

Сравнительный анализ результатов текстурных измерений образцов карбонатных пород, выполненных методами рентгеновской и нейтронной дифракции, был сделан в работе [37]. К. Уллемайером с соавторами [38] проведено сопоставление данных, полученных при определении текстуры двухфазного образца горной породы мусковит-кварцит, с помощью четырех различных методов, применяемых в геологии и геофизике, — оптический уни-

версальный метод, метод обратного электронного рассеяния, рентгеновская текстурная гониометрия обратного отражения и времяпролетная нейтронная дифракция. В работе обсуждаются достоинства и недостатки перечисленных методов для изучения геологических материалов.

**1.3. Измерение полюсных фигур методом нейтронной дифракции. Основные преимущества нейтронографического текстурного анализа.** Основная задача текстурного анализа — это получение информации о распределении ориентаций кристаллитов в исследуемом образце. Наглядным способом представления предпочтительных ориентировок являются полюсные фигуры.

Полюсной фигурой называется графическое изображение функции распределения  $P_{hkl}$  нормалей (полюсов) к одной определенной кристаллографической плоскости (hkl). Часто полюсной фигурой называют саму функцию  $P_{hkl}$ . Для графического изображения функции обычно используют стереографическую проекцию. Функция  $P_{hkl}$  представляет собой вероятность совпадения нормали к плоскости (hkl) с различными направлениями в образце.

Направление нормали к плоскости (hkl) в системе координат образца определяется полярным  $\Phi$  и азимутальным  $\gamma$  углами:  $\gamma = (\Phi - \pi)$ . Таким образом, функция распределения  $P_{hkl}$  задается в виде  $P_{hkl}(\Phi, \gamma)$ . Любую функцию, зависящую от направления, можно разложить в ряд по сферическим функциям  $k_l^\mu$ . Для разложения функции  $P_{hkl}$  применяют симметричные сферические функции  $k_l^\mu$ , обладающие симметрией образца.  $P_{hkl}(\Phi, \gamma)$  можно представить в виде суммы ряда:

$$P_{hkl}(\Phi, \gamma) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{\nu=1}^{N(l)} F_l^\nu(hkl) k_l^\nu(\Phi, \gamma). \quad (1)$$

На практике бесконечный ряд (1) заменяют конечным, обрывая при некотором  $l = l_{\max}$ . Коэффициенты можно рассчитать из экспериментально определенной полюсной фигуры по соотношению

$$F_l^\nu(hkl) = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} P_{hkl}(\Phi, \gamma) k_l^\nu(\Phi, \gamma) \sin \Phi d\Phi d\gamma. \quad (2)$$

При измерении полюсных фигур с помощью дифракции нейтронов используют образцы в виде шаров или чаще в виде кубиков. В отличие от рентгеновских измерений, для которых необходимы образцы с полированными поверхностями или тонкие шлифы, нейтронографический текстурный анализ не требует специальной технологии подготовки образцов. Более того, нейтронная дифракция позволяет измерить на одном образце полные полюсные фигуры. Использование позиционно-чувствительных или многодетекторных систем при конструировании нейтронных спектрометров [39] дает возможность одновременно измерять несколько полюсных фигур и с помощью

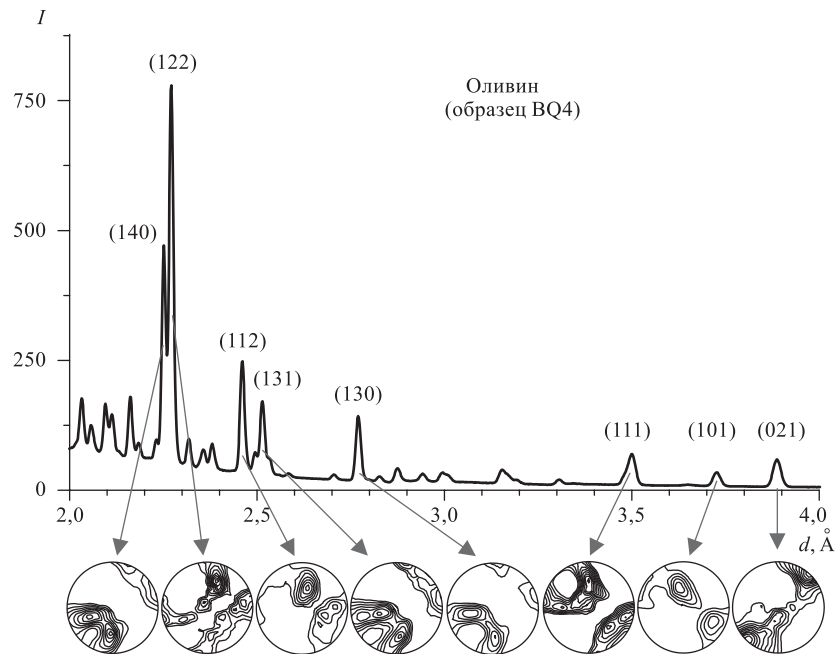


Рис. 1. Дифракционный спектр и полюсные фигуры, соответствующие индексированным рефлексам.  $I$  — интенсивность потока нейтронов

специального профильного анализа разделять перекрывающиеся брэгговские рефлексы на спектрах [38].

Индексация полюсных фигур происходит в соответствии с индексацией рефлексов, обусловленных рассеянием нейтронов фиксированной длины волны от кристаллографических плоскостей с одинаковым параметром решетки  $d$  (рис. 1). Полюсные фигуры определяются в виде массива данных полюсных плотностей и могут быть визуализированы с помощью стереографической проекции.

Главные преимущества применения рассеяния нейтронов в анализе текстур геологических материалов:

- 1) высокая статистическая представительность (тысячи зерен в сравнении с сотнями зерен, которые можно проанализировать с помощью оптического микроскопа);
- 2) исследование объемных текстур в отличие от локальных (поверхностных) текстур, которые можно измерить методом рентгеновской дифракции;
- 3) изучение как крупно-, так и мелкозернистых природных материалов;

- 4) текстурный анализ минералов с низкой симметрией;
- 5) исследования многофазных пород и проведение текстурного анализа отдельных минеральных компонент, что недоступно для других дифракционных и прямых методов текстурного анализа;
- 6) исследование эволюции текстуры в образцах, помещенных в камеры высоких давлений и температур, что недоступно как для дифракционных, так и для прямых методов текстурного анализа.

Количественный текстурный анализ (КТА) с использованием нейтронов уже сейчас применяется и к мономинеральным, и к многофазным геологическим материалам [40, 41].

Было предпринято несколько попыток в плане комбинирования структурного, текстурного анализов и анализа напряжений/деформаций образцов горных пород с помощью дифракции нейтронов. Р.-Х. Венк [42] предложил метод, в котором используется весь дифракционный спектр, а не отдельные брэгговские рефлексы, в комбинации количественного текстурного анализа с кристаллографическим методом Ритвельда. Достоинства ритвельдовского текстурного анализа проиллюстрированы на примере времяпролетных нейтронных данных, полученных на экспериментально деформированном кальците [43]. Оказалось возможным получение количественной информации о текстуре, кристаллической структуре, микроструктуре и остаточных напряжениях на основе неполных полюсных фигур и из участков дифракционного спектра, содержащего перекрывающиеся пики.

Нейтронная дифракция обладает возможностью одновременного изучения эволюции микроструктур, включая дегидратацию, фазовый переход, структурные превращения в минералах и текстурные преобразования, а также формирование напряжений/деформаций с использованием современных экспериментально-измерительных комплексов, подобных SKAT-ТКОС и EPSILON-MDS (Дубна, Россия) или HIPPO (Лос-Аламос, США).

**1.4. Количественный текстурный анализ. Основная задача КТА.** Математически кристаллографическая текстура описывается при помощи функции распределения кристаллитов по ориентациям их кристаллографических осей (ФРО) [44–47]. Однако ФРО не может быть получена непосредственно из эксперимента, можно измерить только ее интегральные проекции, полюсные фигуры. При этом основной задачей количественного текстурного анализа является вычисление ФРО при наличии конечного числа полученных из эксперимента ПФ. Распространенными методами решения этой задачи являются методы Роу–Бунге [48, 49] и аппроксимации ФРО стандартными функциями [50–53].

Ориентация кристаллографических осей кристаллитов относительно друг друга в поликристаллическом материале может быть определена при помощи вращений  $g$ . Если с рассматриваемым образцом связана ортогональная система координат  $K_A$  (лабораторная система координат), а с кристаллогра-

фической решеткой  $i$ -го кристаллита — ортогональная система  $K_B^i$  (система координат кристаллита), то ориентация  $g$  определяет вращение, переводящее систему координат  $K_A$  в  $K_B^i$ . Данное вращение задается тремя углами Эйлера  $\{\varphi, \vartheta, \psi\}$  и принадлежит группе вращений трехмерного евклидова пространства  $SO(3)$ .

ФРО  $f(g)$  определяет объемную долю кристаллитов материала, кристаллографическая система координат которых повернута относительно лабораторной на углы  $\varphi'$ ,  $\vartheta'$  и  $\psi'$ , лежащие внутри телесного угла  $dg$ , который представляет собой инвариантную меру на группе  $SO(3)$ :

$$\frac{dV(g)}{V} = f(g) dg = \frac{1}{8\pi^2} f(\varphi, \vartheta, \psi) \sin \vartheta d\varphi d\vartheta d\psi. \quad (3)$$

При этом интеграл от этой функции по некоторой области  $u$  интерпретируется как вероятность обнаружить случайную ориентацию  $g$  в этой области.

Если в системе  $K_B^i$  выбрана некоторая кристаллографическая плоскость с нормалью  $\mathbf{h}_i$ , то ПФ  $P_{\mathbf{h}_i}(\mathbf{y})$  определяет объемную долю кристаллитов, для которых различные направления  $\mathbf{y}$  системы координат  $K_A$  лежат в бесконечно малом объеме с направлением нормали  $\mathbf{h}_i$  к  $i$ -й кристаллографической плоскости кристаллита. Отметим, что направления  $\mathbf{y}$  и  $-\mathbf{y}$ , а также направления  $\mathbf{h}_i$  и  $-\mathbf{h}_i$  в эксперименте физически неразличимы, поэтому становятся неразличимы и соответствующие ПФ. Тогда вероятность того, что объем  $v$  случайно ориентированных кристаллитов в образце будет иметь направление  $\mathbf{h}_i$ , имеет вид

$$p(v) = \int_v P_i(\mathbf{y}) d\mathbf{y} = \frac{1}{4\pi} \int_v P_i(\varphi, \vartheta) \sin \vartheta d\vartheta d\varphi. \quad (4)$$

Здесь  $\varphi$  и  $\vartheta$  — сферические координаты вектора  $\mathbf{y}$ . При этом ФРО  $f(g)$  и ПФ  $P_i(\mathbf{y})$  связаны между собой интегральным соотношением

$$P_{\mathbf{h}_i}(\mathbf{y}) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \{f([\mathbf{h}_i, \xi]^{-1}[\mathbf{y}, 0]) + f([- \mathbf{h}_i, \xi]^{-1}[\mathbf{y}, 0])\} d\xi, \quad (5)$$

где  $[\mathbf{y}, 0] = \{\varphi, \vartheta, 0\}$  — вращение в  $SO(3)$ ;  $[\mathbf{h}_i, \xi]^{-1}$  — вращение, обратное к  $[\mathbf{h}_i, \xi]$ .

Таким образом, математическое решение задачи восстановления ФРО по ПФ состоит в нахождении  $f(g)$ , удовлетворяющей системе интегральных уравнений (5), при заданном конечном наборе полученных из эксперимента ПФ  $P_{\mathbf{h}_i}(\mathbf{y})$ .

В [48, 49] был предложен получивший широкое распространение метод вычисления ФРО, состоящий в представлении ФРО в виде ряда по обобщенным шаровым функциям и полюсных фигур в виде ряда по сферическим функциям.

Было показано [45], что знание даже всех теоретически возможных ПФ может дать информацию только о коэффициентах разложения четной составляющей ФРО. Таким образом, ФРО принципиально не может быть однозначно определена по ПФ.

Одна из первых предложенных аппроксимаций ФРО нормальным распределением содержится в работе [44]. Это распределение было получено по аналогии с известным распределением Гаусса на прямой. Однако более строгим подходом является построение ФРО на основе центральной предельной теоремы теории вероятности. Именно этот подход был использован в работах [50, 51], где рассматриваются круговые и некруговые нормальные распределения, так называемые центральные нормальные распределения, имеющие вид

$$\Phi(g, g_0, \varepsilon) = \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) \exp(-l(l+1)\varepsilon^2) \frac{\sin((l+1/2)t)}{\sin(t/2)}, \quad (6)$$

где  $\cos t = (\text{Tr}(g_0^{-1}g) - 1)/2$ .

Отвечающие этому распределению ПФ записываются в виде

$$P_{\mathbf{h}_i}(\mathbf{y}) = \sum_{k=0}^{\infty} (4k+1) \exp(-2k(2k+1)\varepsilon^2) P_{2k}(\cos \vartheta), \quad (7)$$

где  $P_{2k}(\cos \vartheta)$  — нормированные полиномы Лежандра, а  $\cos \vartheta = (\mathbf{h}_i \cdot g_0 \mathbf{y})$ . При этом функции (6) и (7) можно аппроксимировать более простыми выражениями:

для ФРО

$$\Phi(g, g_0, \varepsilon) \approx \left[ \frac{1}{\varepsilon^3} \exp(\varepsilon^2/4) \text{erfc}(\varepsilon/2) + \frac{1}{\varepsilon^2} \right] \frac{t/2}{\sin(t/2)} \exp(-t^2/4\varepsilon^2), \quad (8)$$

для ПФ

$$P_{\mathbf{h}_i}(\mathbf{y}) \approx \frac{1}{2\varepsilon^2} [\exp(-\vartheta^2/4\varepsilon^2) + \exp(-(\pi - \vartheta)^2/4\varepsilon^2)]. \quad (9)$$

Представления (6) и (7) были использованы в [52–54] для поликристаллических материалов различных симметрий. Для количественного анализа текстур геологических материалов достаточно часто используют компонентный метод [54, 55], который применим к кристаллам любой симметрии и, что особенно важно, позволяет выполнять текстурный анализ двух и более минеральных фаз одновременно.

**1.5. Нейтронные спектрометры для исследования текстур, напряжений и свойств геоматериалов в исследовательских центрах мира.** Нейтронные текстурные дифрактометры могут работать аналогично рентгеновским на постоянной длине волны на стационарных реакторах или использовать время-пролетный метод на импульсных реакторах и ускорителях.



*Дифрактометры на стационарных источниках нейтронов.* Простейший дифрактометр, установленный на пучке тепловых нейтронов стационарного реактора, соответствует традиционному четырехосному дифрактометру, оснащенный рамкой Эйлера в качестве гониометра и счетчиком, т. е. является инструментом для исследований структуры монокристаллов. Измерения интенсивностей, зависящих от ориентировки образца, выполняются с помощью детектора, который позиционируется стационарно в положении максимума пика, т. е. осуществляется шаговое сканирование по равноплощадной сетке полюсной фигуры. К такому типу дифрактометров относятся TEX-2 на исследовательском реакторе FRG-1 в центре GKSS (Гестахт, Германия), который предназначен для текстурного анализа (преимущественно высокосимметричных материалов) [56]. В случае инструмента с одним детектором полюсные фигуры, необходимые для восстановления ФРО, измеряются последовательно одна за другой, что требует больших затрат времени.

Весьма эффективными для текстурного анализа геоматериалов являются приборы, оснащенные системой позиционно-чувствительных детекторов. К таким приборам, на которых возможно проведение текстурных измерений, относятся двухосный спектрометр D1B и порошковый дифрактометр D20, функционирующие в Институте Лауэ–Ланжевена (ILL, Гренобль, Франция).

Первым инструментом, использованным для текстурных исследований низкосимметричного плагиоклаза, был D1B на высокопоточном источнике ILL в Гренобле [57]. Спектрометр D1B характеризуется наличием системы сменных монохроматоров и располагает подвижным многодетекторным модулем. Спектрометр снабжен специальным криостатом для проведения экспериментов в широком интервале температур.

Дифрактометр D20 характеризуется наличием линейно искривленной позиционно-чувствительной детекторной системы, а также достаточно широким интервалом рабочих длин волн.

В научно-исследовательском центре в Юлихе (Германия) действует текстурный дифрактометр SV7b, установленный на нейтронном пучке в экспериментальном зале исследовательского реактора FRJ-2. Инструмент оснащен различными монохроматорами с кристаллическим покрытием, позволяющим получать длины волн от 0,9 до 2,3 Å. Применение специальных ( $\lambda/2$ )-фильтров, подавляющих шумы высших порядков, позволяет улучшить экспериментальные полюсные фигуры, регистрируемые при исследовании геологических материалов.

Текстурный дифрактометр оснащен позиционно-чувствительным сцинтилляционным детектором типа JULIOS, установленным на свободно вращающейся платформе. Он способен покрывать угол  $\Delta 2\theta = 50^\circ$ . Детектор оборудован также сменными эйлеровскими рамами, позволяющими проводить измерения на образце как при нормальных условиях, так и при пониженных температурах при размещении рамы внутри гелиевого криостата.

Благодаря позиционно-чувствительному детектору дифрактометр SV7b используется как рабочий инструмент в основном для исследования горных пород [58–60].

**Дифрактометры на импульсных источниках нейтронов.** К особенностям, определяющим методику и схему дифракционного эксперимента на импульсных источниках, можно отнести то, что реакторный импульс тепловых нейтронов имеет непрерывный спектр, скорость тепловых нейтронов невелика и есть возможность осуществить анализ энергии (или длины волны) нейтрона по времени пролета (Time-Of-Flight или TOF-эксперимент).

Текстурный дифрактометр СКАТ [61] действует на пучке реактора ИБР-2 (ОИЯИ, Дубна). Вся его детекторная система, содержащая девятнадцать детекторов, расположена на монтажном кольце диаметром 2 м, аксиально симметрично нейтронному пучку. Результирующая времяпролетная база (расстояние между замедлителем и детектором) составляет 103,8 м. Детекторы могут фиксироваться в любой позиции углового интервала  $2\pi$ , охватываемого детекторным кольцом. Угол рассеяния для всех детекторов одинаковый ( $2\Theta = 90^\circ$ ). Исследуемый образец помещается в центре кольца и вращается в гониометре, который выдерживает вес аппаратуры до 30 кг, вокруг горизонтальной оси  $Z$ , расположенной под углом  $45^\circ$  к падающему нейтронному пучку.

Спектрометр СКАТ по сравнению с другими подобными приборами имеет ряд преимуществ.

— Дифракционные пики, соответствующие конкретному значению  $d_{hkl}$ , регистрируются всеми детекторами в одинаковом положении (времяпролетных каналах) на всех дифракционных спектрах, полученных от измеряемого образца. Поэтому нет необходимости вводить поправки, зависящие от угла рассеяния и длины волны.

— Поскольку угловой диапазон установки детекторов  $180^\circ$ , то для измерения полной полюсной фигуры достаточно произвести однократное вращение образца в гониометре.

— Важно то, что в центре детекторного кольца СКАТ образец можно окружать различными системами воздействий, например, нагревателями, камерами высокого давления, устройствами, создающими электрические и магнитные поля, и т. д.

Главное преимущество TOF-дифрактометров, и СКАТ в том числе, состоит в одновременной регистрации различных полюсных фигур в доступное измерительное время. Это особенно важно для текстурных измерений низко-симметричных и многофазных геологических материалов [62,63].

На том же пучке реактора ИБР-2 в Дубне находится нейтронный спектрометр высокого разрешения НСВР [64], на котором проводились текстурные измерения начиная с 1988 г. В настоящее время дифрактометр НСВР выведен из эксплуатации и находится в стадии реконструкции, что

связано с необходимостью расширения текстурных измерений геологических образцов.

В течение нескольких лет инструмент ROTAX, установленный на испарительном источнике нейтронов ISIS в лаборатории Резерфорда–Эплтона (Великобритания), действует как многоцелевой порошковый и текстурный дифрактометр [65], оснащенный постоянными позиционно-чувствительными детекторами JULIOS. Его функционирование в виде TOF-дифрактометра углового рассеяния на времяпролетной базе  $\sim 15$  м позволяет эффективно использовать полихроматический нейтронный спектр. Следует заметить, что сочетание белого пучка TOF-метода и использование линейного детектора преследуют одновременно две цели:

- 1) уменьшение количества вращений образца при сканировании полюсной фигуры;
- 2) одновременное измерение большого числа полюсных фигур с различными (hkl).

Текстурный анализ с использованием TOF-метода и двухмерной детекторной системы осуществлен на импульсном источнике нейтронов LANSCE в Лос-Аламосе (США) и на IPNS в Аргонской лаборатории (США). Сканирование различных полюсных фигур выполняется при изменении положения образца в дифрактометрах, первоначально предназначенных для дифракции на монокристаллах и дополненных гониометром и другим типом двумерных детекторов.

В Лос-Аламосе введен в действие дифрактометр HIPPO (High Pressure Preferred Orientation) для измерения преимущественных ориентировок при высоких давлениях [66]. Высокоинтенсивный TOF-дифрактометр имеет короткую начальную времяпролетную базу (9 м) и будет использоваться в основном для исследований при высоких давлениях и для текстурных измерений. Он характеризуется новым трехмерным расположением детекторных банок из 1400 гелиевых трубок, расположенных на пяти конических кольцах, соответствующих положению под углами  $2\Theta = 10, 20, 40, 90$  и  $150^\circ$ . Измеряемые межплоскостные расстояния — от 0,5 до 9,0 Å. Традиционный трехосный гониометр, соответствующий геометрии Каппа, использован для стандартных текстурных измерений. Устройство для изменения положения образца (32 позиции) позволяет быстро провести текстурный анализ многофазного образца, что важно для систематических исследований больших серий геологических образцов.

Системы окружения образца изготовлены специально для изучения образцов в достаточно широком диапазоне температур ( $4 < T < 200$  К) и давлений ( $0,1 \text{ МПа} < p < 20$  ГПа). Наряду с изучением текстурных изменений в материалах при различных термодинамических параметрах, на дифрактометре проводится исследование структуры вещества, внутренних напряжений, магнитных свойств различных материалов и т. д. Функционирование установки

в широком интервале давлений и температур сделает возможным проведение *in situ* динамических измерений в ходе химических реакций, процессов деформации и рекристаллизации.

В научно-исследовательском центре Аргонской национальной лаборатории (США) работы по определению и изучению кристаллографических текстур ведутся с помощью порошкового дифрактометра общего назначения GPPD (General Purpose Powder Diffractometer) на интенсивном импульсном источнике нейтронов IPNS. Конструкция прибора и различные комплектующие приспособления позволяют решать довольно широкий спектр задач материаловедения. Подвижная многодетекторная система дифрактометра способствует изучению структурных параметров, микронапряжений и текстур материалов с достаточно высокой точностью. Существует также возможность проведения экспериментов с использованием нагревателей и камер высокого давления.

## 2. СВЯЗЬ МЕЖДУ ТЕКСТУРАМИ И ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ГОРНЫХ ПОРОД И МЕТЕОРИТОВ

**2.1. Текстуры и упругие свойства горных пород при высоких гидростатических давлениях.** Авторами [67] были начаты комплексные исследования факторов, определяющих упругую анизотропию мантийных пород при различных гидростатических давлениях, с помощью нейтронографического текстурного анализа на дифрактометре НСВР и ультразвукового пространственного измерения скоростей продольных волн на сферических образцах. В дальнейшем эти исследования были продолжены на СКАТ [68].

Приведем результаты, полученные на дифрактометре СКАТ для некоторых образцов ксенолитов и дунитов из разных регионов Европы. Исследованные образцы представляли в основном однофазные горные породы, образованные форстеритом (оливином). Конкретные данные о составе, местах отбора и происхождении образцов содержатся в работе [68].

На основе нейтронно-дифракционных измерений образцов ксенолитов и дунитов и совокупности экспериментальных полюсных фигур был проведен количественный текстурный анализ образцов, т.е. восстановлены ФРО и рассчитаны полюсные фигуры для главных кристаллографических плоскостей (100), (010) и (001) (рис. 2), которые описывают преимущественные ориентировки, связанные с экстремальными направлениями распространения скоростей упругих волн в кристалле оливина.

В образцах дунитов 9721, 9722 (Иврийская зона, Италия), ВQ4 (Албания) и NA5N (Норвегия) преимущественная ориентировка плоскостей (100) представлена в виде поясов с хорошо выраженными максимумами, распределенными вдоль поясов. В направлении (010) кристаллов оливина наблю-

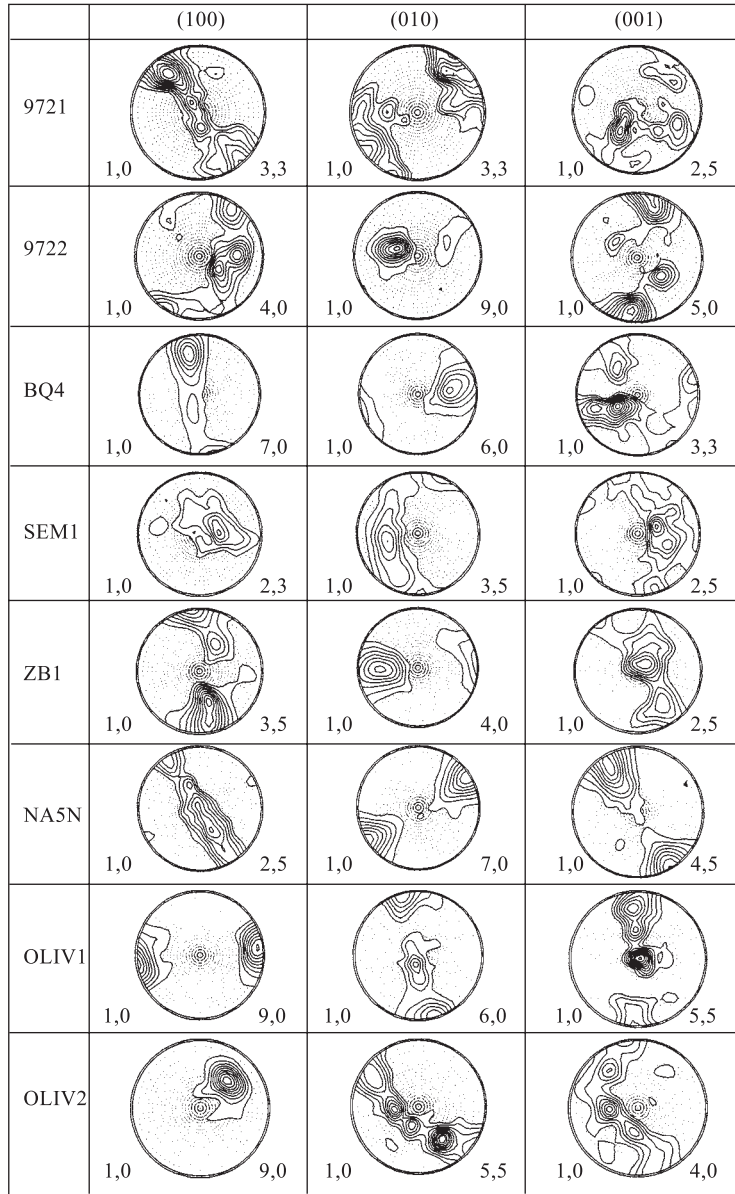


Рис. 2. Полусные фигуры главных кристаллографических плоскостей оливина в лабораторной системе координат

дается достаточно компактный максимум с высокой полюсной плотностью. Полюсные фигуры (001) характеризуются сложной конфигурацией изолиний с несколькими перекрывающимися максимумами.

Совсем другая картина наблюдается в образцах ксенолитов OLIV1 и OLIV2 (Канарские острова). Для текстуры этих образцов характерны компактные максимумы высокой интенсивности на полюсных фигурах (100), в то время как ориентировка базовых плоскостей (010) и (001) образует или имеет тенденцию к образованию поясов с ярко выраженным максимумом полюсной плотности.

Текстура оливина в ксенолитах SEM1 и ZB1 (Железный Брод, Чехия) менее острая, чем в ксенолитах с Канарских островов, что отражается в значениях максимальной полюсной плотности на полюсных фигурах, и более размытая, хотя полюсные фигуры всех ксенолитов имеют сходную картину линий уровня.

Количественная информация о текстуре в виде ФРО, восстановленных из дифракционных данных, позволила провести моделирование скоростей упругих волн в поликристаллических оливиновых образцах, обладающих кристаллографической текстурой [68]. Оно предполагало вычисление всех компонент тензора упругих постоянных поликристаллических образцов известными методами усреднения на основе ФРО и упругих модулей монокристалла оливина, а также построение карт изолиний, отражающих распределение скоростей продольных волн на сфере. Табличные значения компонент тензора упругих постоянных оливина взяты из [69].

Рассчитанные карты изолиний пространственного распределения скоростей  $P$ -волн в системе координат, соответствующей положению образца в дифракционном эксперименте, показаны на рис. 3.

Для тех же образцов с помощью ультразвукового метода [70] были измерены скорости продольных упругих волн при различных всесторонних давлениях. Метод состоит в том, что в различных направлениях вдоль диаметра сферического образца осуществляется излучение и прием ультразвуковых импульсов двумя пьезоакустическими преобразователями, имеющими точечный контакт с поверхностью. Электроакустические преобразователи движутся в плоскости, проходящей через ось вращения. Предложенная система позволяет измерять время пробега упругого импульса в любом направлении и вычислять значения скоростей. При вращении образца дискретно с шагом  $15^\circ$  получают совокупность данных из 150 точек, которые наносятся на стереографическую сетку, связанную с системой координат сферического образца. Следует заметить, что в одной системе координат построены модельные карты изолиний скоростей упругих волн и полюсные фигуры из дифракционного эксперимента.

Измерения скоростей распространения продольных упругих волн проводились циклически, сначала при атмосферном давлении, затем при да-

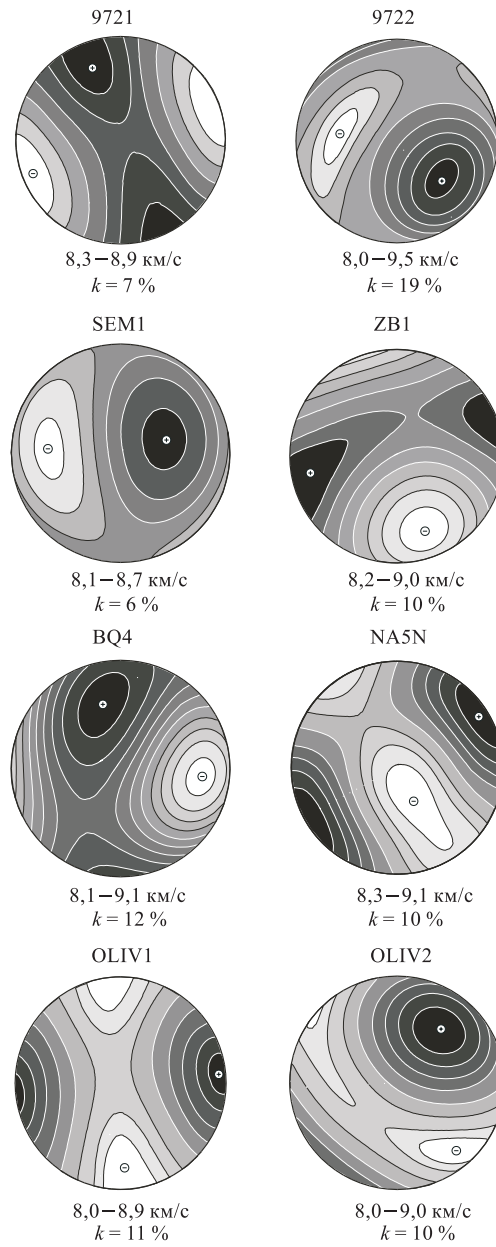


Рис. 3. Карты изолиний скоростей продольных упругих волн исследованных оливинитов, рассчитанные с помощью ФРО

Таблица 1. Экспериментальные значения скоростей продольных упругих волн и их анизотропия при различных всесторонних давлениях

Образец	$p$ , МПа	$V_{p_{\max}}$ , км/с	$V_{p_{\min}}$ , км/с	$k$ , %
9721	0,1	8,0	7,0	14
	100	8,2	7,3	12
	400	8,3	7,5	11
9722	0,1	9,4	7,6	24
	100	9,4	7,8	21
	400	9,6	7,8	23
BQ4	0,1	8,2	6,9	19
	100	8,8	7,9	11
	400	8,9	8,0	11
SEM1	0,1	6,5	6,0	8
	100	7,4	7,1	4
	400	7,9	7,5	5
ZB1	0,1	5,8	4,7	23
	100	7,8	7,3	7
	400	8,3	7,6	9

влениях 10, 20, 50, 100, 200, 400 МПа и при обратном ходе с такими же значениями по шкале нагрузок [63, 68, 71]. В табл. 1 содержатся значения максимальных и минимальных скоростей продольных волн в образцах, а также значения коэффициентов анизотропии, которые рассчитывались по формуле

$$k = (V_{p_{\max}} - V_{p_{\min}}) / V_{p_{\text{mean}}} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

где  $V_{p_{\max}}$ ,  $V_{p_{\min}}$  и  $V_{p_{\text{mean}}}$  — максимальное, минимальное и среднее значение скоростей продольных упругих волн соответственно.

Из табл. 1 видно, что при атмосферном давлении все исследуемые образцы характеризуются высокой анизотропией скоростей  $P$ -волн.

У образцов 9721 и 9722 коэффициент анизотропии практически не меняется с давлением. Такое поведение образцов подтверждается на графике, представляющем зависимость коэффициентов анизотропии скоростей продольных волн  $k$  от величины гидростатического давления  $p$  (рис. 4). Характер упругой анизотропии различных образцов с ростом гидростатического давления существенно отличается. Образцы дунитов 9721, 9722 и BQ4 составляют одну группу, у которой во всем интервале давлений значения коэффициентов анизотропии практически не меняются, в образцах ксенолитов SEM1 и ZB1 обнаруживается уменьшение коэффициента анизотропии  $k$  при давлениях до 100 МПа, а затем его последующий монотонный рост.



На рис. 5 представлены карты изолиний скоростей продольных волн, построенные по экспериментальным данным, полученным при давлениях 0,1, 100 и 400 МПа для этих же образцов, которые отражают характер пространственного изменения упругой анизотропии породы с ростом давления. Образцы дунитов 9721 и 9722 обладают стабильными картинами распределения скоростей продольных волн во всем диапазоне гидростатических давлений. Для образца ВQ4 конфигурация изолиний скоростей продольных упругих волн с ростом давления меняется, положения максимума и минимума (в большей степени) скоростей на стереографической проекции смещаются, но, начиная с давления 100 МПа и выше, картина, в основном, стабилизируется. При атмосферном давлении у образцов ксенолитов ZB1 и SEM1 (рис. 5) на картах изолиний отсутствует закономерный характер распределений. С ростом давления изолинии приобретают более правильную, симметричную конфигурацию. Положения максимумов и минимумов скоростей смещаются, а в случае образца ZB1 даже меняются местами. С дальнейшим ростом величины всестороннего давления от 100 до 400 МПа карты пространственного распределения скоростей становятся более сглаженными.

Сравнение модельных распределений  $V_p$  (рис. 3) с экспериментальными, полученными из ультразвукового эксперимента при давлении 400 МПа (рис. 5), показывает их практическое совпадение, что является доказательством того, что упругая анизотропия этих пород при высоких давлениях обусловлена кристаллографической текстурой оливина. Некоторые отличия модельных и экспериментальных карт изолиний упругих волн, а также величин максимальных, минимальных скоростей и рассчитанных коэффициентов упругой анизотропии  $k$  можно объяснить следующей причиной. При моделировании скоростей продольных волн в расчет принимался только один фактор, влияющий на упругую анизотропию объемного образца дунита или ксенолита, — кристаллографическая текстура. По-видимому, влияние текстуры формы или, наоборот, наличие беспорядочно ориентированных дефектов даже при высоком всестороннем давлении может привести как к усилению анизотропии, обусловленной главным образом кристаллографической текстурой, так и к ее ослаблению.

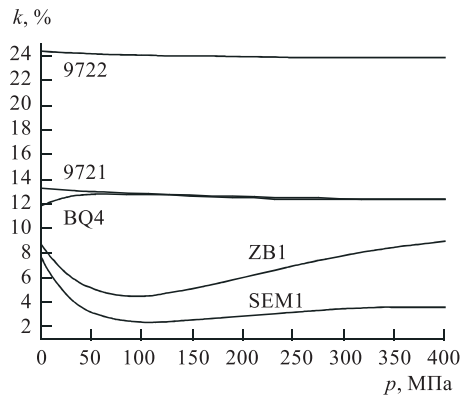


Рис. 4. Зависимости коэффициентов упругой анизотропии образцов от величины всестороннего давления

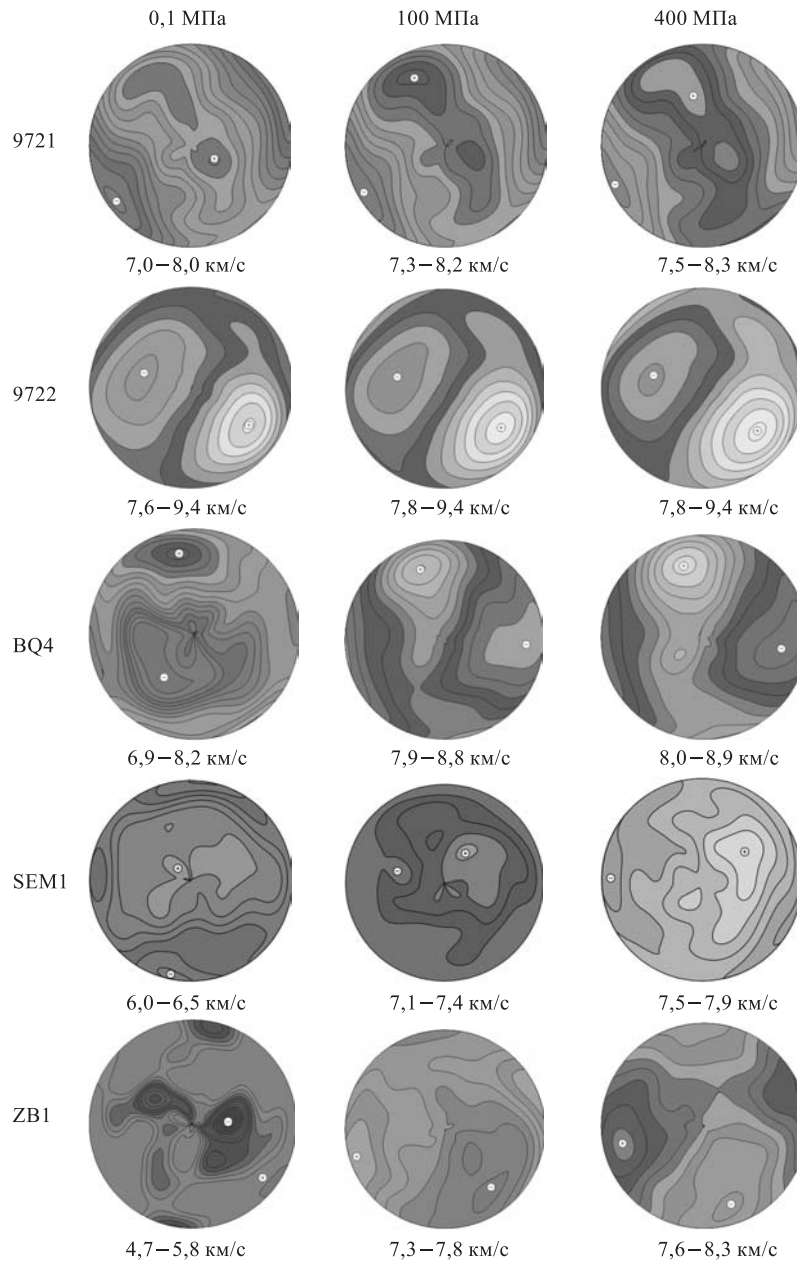


Рис. 5. Карты изолиний скоростей продольных упругих волн образцов оливинитов при атмосферном давлении, а также при 100 и 400 МПа

**2.2. Текстуры и пьезоэлектрические свойства горных пород.** Объемный пьезоэлектрический эффект в горной породе проявляется только тогда, когда кроме предпочтительной ориентировки электрических осей зерен кварца существует еще и полярно согласованная ориентировка этих осей.

Первое сообщение о наличии пьезоэлектрических свойств в горных породах появилось в работе М. П. Воларовича и Э. И. Пархоменко [72]. Объяснение природы пьезоэлектрического эффекта поликристаллов (горных пород в частности) было дано на основе теории пьезоэлектрических текстур, разработанной А. В. Шубниковым [73].

Первым доказательством пьезоэлектрической природы эффекта в горных породах явилось характерное только для пьезоэлектрических кристаллов изменение знака поляризационного заряда при изменении знака нагружения. В опытах с поликристаллическими породами, так же, как и с монокристаллами кварца, при нагружении образца сжимающим, а затем растягивающим усилием происходит изменение знака заряда. При возбуждении пьезоэффекта ультразвуком изменение фазы механических колебаний образца на  $\pi$  сопровождается таким же изменением фазы электрических колебаний. Другое доказательство пьезоэлектрической природы эффекта — установление обратного пьезоэффекта, наблюдавшегося при включении образца горной породы в качестве излучателя ультразвука, т. е. при подаче на образец электрического сигнала регистрировались ультразвуковые колебания.

Авторами [74, 75] была разработана экспериментальная методика для обнаружения именно текстурной природы пьезоэффекта поликристаллов. В основу методики положено свойство пьезоэлектриков, заключающееся в закономерном (обусловленном симметрией пьезоэлектрических свойств материала) распределении плотности поляризационного заряда по поверхности образца при определенном виде статического нагружения (или динамического возбуждения). Сопоставление экспериментально измеренных угловых зависимостей пьезоэффекта у образцов с теоретическими сечениями указательных поверхностей позволяет установить текстурную природу пьезоэффекта и определить тип симметрии пьезоэлектрических свойств.

В последние годы благодаря применению нейтронной дифракции, дающей наиболее полную количественную информацию о текстурах больших поликристаллических образцов, появились работы, содержащие совершенно новую информацию о текстурах пьезоэлектрически активных образцов. В работах [76, 77] исследовался образец жильного кварца, обладавший высокой пьезоэлектрической активностью. Для этого образца с помощью нейтронного спектрометра НСВР (ОИЯИ, Дубна) были измерены полюсные фигуры по методу времени пролета. Полюсные фигуры обладали симметрией либо шестого, либо третьего порядка (рис. 6). Затем на образце регистрировались угловые зависимости пьезоэлектрического поля (рис. 7) электрометрическим методом точечного подвижного электрода при ультразвуковом возбуждении

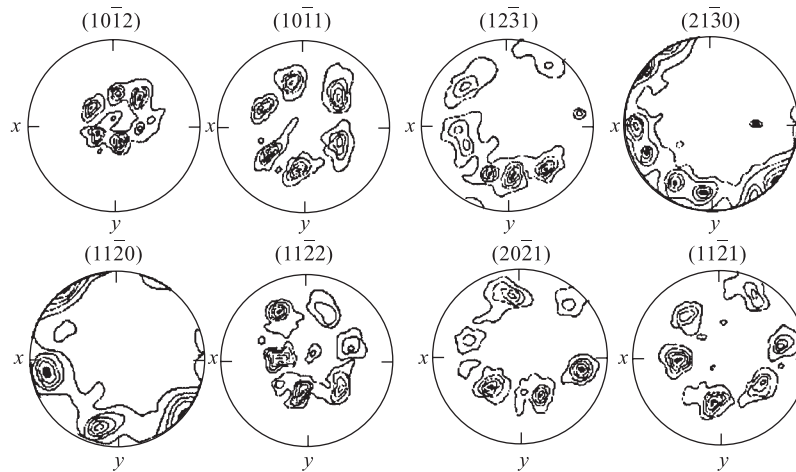


Рис. 6. Полусные фигуры образца жильного кварца, измеренные методом дифракции нейтронов на спектрометре НСВР

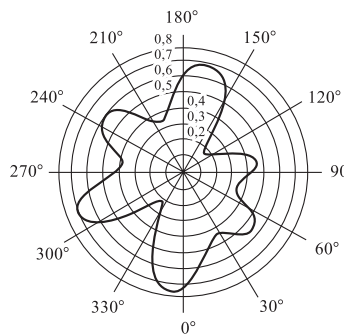


Рис. 7. Угловая зависимость пьезоэлектрического поля жильного кварца. Ось цилиндрического образца перпендикулярна плоскости, в которой преимущественно ориентированы кристаллографические оси  $\{11\bar{2}0\}$

образца [74]. Анализ результатов нейтронографических и электрометрических измерений позволил сделать вывод о том, что распределение линий полюсной плотности на полюсных фигурах хорошо согласуется со структурой и свойствами пьезоэлектрического поля образца. Представленный комплекс данных убедительно характеризовал пьезоэлектрическую активность горной породы как результат ее специфического текстурного строения.

Объяснение природы пьезоэлектрического эффекта в горных породах на основе теории А. В. Шубникова не принималось некоторыми геофизиками. Исследователи [78] пытались трактовать возникновение пьезоэлектрических свойств в горной породе вследствие присутствия больших, не скомпенсированных по электрическому заряду зерен.

Одним из первых Бишоп [79] на статистически представительных по объему кубических образцах экспериментально подтвердил существование пьезоэлектрического эффекта, благодаря особенностям текстурного строе-

ния горной породы, образованной минералами-пьезоэлектриками. На основе дополнительных экспериментальных исследований авторы [80] провели сопоставление пьезоэлектрических данных, полученных на образцах жильного кварца кубической формы, взятых с различных точек поверхности жилы, и результатов нейтронографических исследований тех же образцов. Измерения пьезоэлектрического эффекта жильного кварца наглядно подтвердили его текстурное происхождение, т. е. измеренный эффект по своему значению оказался выше, чем ожидаемый статистический эффект. Текстурные измерения с помощью нейтронной дифракции обнаружили наличие закономерной преимущественной ориентировки (электрических)  $a$ -осей кварца, которая обуславливает пьезоэлектрический эффект объемного образца горной породы.

Важным и, по-видимому, не решенным до конца вопросом является объяснение физических механизмов и процессов, приводящих к образованию в естественных условиях земной коры пород с пьезоэлектрическими свойствами. Выдвинуто три предположения о физической природе происхождения пьезоэлектрических текстур в горных породах [81, 82]. Первое связано с возникновением пьезоэлектрических свойств в текстурах роста благодаря феноменальному свойству кварца — анизотропии скорости роста кварцевого монокристалла в направлении электрических осей. Другой сценарий предполагает, что в результате высокотемпературной пластической деформации в  $\beta$ -кварце образовались предпочтительные ориентировки в условиях сдвига и трехосного нагружения [83]. А при последующем понижении температуры ниже 573 °С в процессе фазового перехода в результате двойникования пьезо-нейтральный агрегат перешел в кварцит с пьезоэлектрическими свойствами. Наконец, автором [82] было сформулировано предположение, что возникновение пьезоэлектрической активности у осадочных пород возможно, например, в условиях длительного существования стационарного электрического поля внутри древних водоемов или же благодаря наличию источника, вызывающего собственную поляризацию осаждающихся пьезоактивных частиц.

**2.3. Текстуры и магнитные свойства.** Все породообразующие минералы горных пород можно разделить на диа-, пара- и ферромагнетики. Результирующая анизотропия магнитной восприимчивости (АМВ) объемного образца горной породы является суперпозицией векторов намагниченности всех минеральных компонентов горной породы. Величина магнитной анизотропии определяется анизотропными свойствами породообразующих минералов [84], формой зерен [85] и кристаллографической текстурой минеральных фаз [86].

Параметры, которые обычно используются для установления анизотропии магнитной восприимчивости, отличаются от тех, которые применяются при измерении полюсных фигур дифракционными или другими методами. Для сравнения метода АМВ с немагнитными методами используется так называемый ориентационный тензор. Главная проблема заключается в преобразовании тензора магнитной восприимчивости в ориентационный тензор

для горных пород, у которых магнитная анизотропия обусловлена минералами с одноосной магнитной анизотропией (филосиликаты, гематит, пирротит) [87].

Метод определения ориентационного тензора из АМВ возможен при выполнении следующих условий:

— АМВ горной породы существует только за счет одинаковых минералов с известной одноосной анизотропией зерен;

— зерна этого минерала имеют одинаковый размер;

— зерна не взаимодействуют собственными магнитными полями.

Следовательно, метод не может быть использован для определения ориентационного тензора горных пород, у которых АМВ обусловлена магнетитом, поскольку его зерна обычно проявляют трехосную анизотропию (вследствие эффекта формы зерна), и степень анизотропии зерен изменяется от зерна к зерну в соответствии с изменением формы. Метод более применим к породам, у которых АМВ обусловлена пирротитом, гематитом, слюдой или хлоритом, поскольку в этих минералах наблюдается магнитно-кристаллическая анизотропия, не зависящая от формы минерала и остающаяся постоянной от зерна к зерну [84].

Одна из важнейших проблем структурной геологии связана с источником магнитной восприимчивости, т. е. с установлением количественной связи между магнитной структурой и минеральной структурой горной породы. Характерные значения магнитной проницаемости ферромагнитных материалов имеют порядок  $(5-6) \cdot 10^{-3}$ . Магнетит является минералом, в котором АМВ главным образом зависит от формы зерна.

Для установления взаимосвязи между текстурой гематита в поликристалле с его магнитной структурой в работе [88] было проведено моделирование полюсных фигур *c*-осей гематитовой горной породы и расчет соответствующих АМВ-диаграмм. Оказалось, что совершенно различающиеся картины преимущественной ориентировки *c*-осей гематитовой породы характеризовались одинаковыми магнитными параметрами. Следовательно, знание АМВ текстурированных образцов не позволяет надежно судить о типе их кристаллографической текстуры. Далее в работе проведено сопоставление между экспериментально измеренной анизотропией магнитной восприимчивости, нейтронографическими полюсными фигурами гематитовой породы и теоретическими данными АМВ, полученными на основе текстурного анализа. Сформулированный вывод касается необходимости дополнения недорогого магнитного метода исследования АМВ результатами более точных нейтронографических или рентгеновских измерений на тех же геологических образцах для получения наиболее полных и качественных знаний о магнитных свойствах текстурированных пород.

Большинство породообразующих минералов являются парамагнетиками и диамагнетиками. Значение магнитной восприимчивости в случае диамаг-

нитных минералов составляет  $1 \cdot 10^{-4}$ , в случае парамагнитных минералов она отрицательна и составляет  $-1 \cdot 10^{-5}$ .

Автором [89] было установлено, что для горных пород, обладающих слабой анизотропией магнитной восприимчивости, кристаллографическая текстура парамагнитных минералов может давать значительный вклад в анизотропию магнитных свойств объемного образца. Расчеты АМВ на основе текстуры были выполнены в работе [90], где были найдены количественные соотношения между преимущественной ориентировкой слюды и магнитной структурой различных типов горных пород (ортогнейсы, гранулиты, милониты), в состав которых входит слюда.

В работе [91] исследована магнитная текстура вулканических лав района Казбеги (Северный Кавказ). Приведенные данные свидетельствуют, с одной стороны, что магнитная текстура сформировалась еще в двигавшейся лаве, с другой стороны, магнитная текстура приобретена, когда поток затвердел и его температура опустилась ниже точки Кюри магнитных минералов.

Приведенные исследования показали, что для многофазных горных пород характерна общая проблема, вызванная взаимодействием и взаимопроникновением структур различных минеральных компонент. Простое решение проблемы может быть достигнуто выбором образцов, у которых носителем АМВ является только один минерал. Однако идентификация этого минерала при игнорировании остальных создает известные трудности, так, например, небольшое количество неучтенного магнетита, который присутствует во многих типах пород, может повлиять на результаты исследований. Для решения этой проблемы исследования на образцах необходимо проводить в условиях изменяющихся сильных магнитных полей для выделения анизотропных компонент, получаемых от отдельных минералов. Однако в литературе отсутствует упоминание о подобных экспериментальных исследованиях АМВ на многофазных горных породах. Проблема нахождения преимущественных ориентировок основных породообразующих минералов в породе с последующим моделированием АМВ-данных может быть успешно решена благодаря применению нейтронографического текстурного анализа.

Помимо кварца и полевого шпата, наиболее важным породообразующим минералом, проявляющим диамагнитные свойства, является кальцит. В исследовании [92] было показано, что величина и направления главных осей АМВ-эллипсоида могут быть с хорошей степенью точности рассчитаны на основе нейтронографических измерений текстур крупнозернистых образцов мрамора (ОИЯИ, Дубна).

**2.4. Текстуры и тепловые свойства горных пород.** Текстуры поликристаллических материалов, образованных кристаллитами с некубической решеткой, контролируют анизотропию тепловых свойств, в частности теплопроводность и тепловое объемное расширение.

Теплопроводность горных пород относится к основным параметрам, необходимым для расчета геотермальных полей. В частности, значения теплопроводности и температурного градиента используются для оценки плотности теплового потока в недрах Земли. Теплопроводность горных пород в земной коре зависит от давления, температуры, минерального состава, а также от типа и степени насыщенности флюидом.

В качестве примера исследования влияния текстуры на анизотропию теплопроводности могут служить результаты экспериментов с образцом парагнейса, извлеченного из керна сверхглубокой скважины КТВ [93]. Значения теплопроводности получены для трех взаимно-перпендикулярных направлений при комнатной температуре при увеличении давления до 60 МПа. Для оценки вклада каждой минеральной компоненты, входящей в парагнейс (кварц, плагиоклаз и мусковит), измеренная теплопроводность сравнивалась с аналогичными величинами минеральных компонент, рассчитанных методами усреднения.

Взаимодействие текстурно-зависимых теплопроводностей кварца, слюды и плагиоклаза демонстрирует сложную природу теплопроводности образца горной породы в целом. Оказалось, что суперпозиция текстур кварца и слюды с почти изотропным плагиоклазом создает сильную анизотропию коэффициентов теплопроводности ( $\sim 32\%$ ). Данные по теплопроводности, полученные в экспериментах на сверхглубокой скважине КТВ, подтверждают результаты моделирования.

Следует, однако, отметить недостаточную представительность результатов, полученных в работе [93]. Об измеренной текстуре кварца говорится как о слабой, хотя не приведены значения полюсной плотности на полюсной фигуре (0001). Отсутствуют численные результаты по пространственному распределению коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , рассчитанному на основе данных о текстурах кварца и слюды. Более того, современные методы моделирования физических свойств позволяют получать картину пространственного распределения текстурно-зависимого свойства для объемного образца в целом, что также отсутствует в цитируемой работе.

Если количественный текстурный анализ образцов горной породы выполнен детально, то вычисления коэффициента теплового расширения возможны по данным о ФРО и его значениям для монокристалла. Подобное моделирование позволяет оценить связь кристаллографической текстуры с видом тензора коэффициентов теплового расширения. Известны работы о влиянии кристаллографической текстуры на тепловое расширение объемных образцов природного мрамора [94–96].

Строения и другие сооружения из мрамора подвержены как механическому (циклом температурного расширения/сжатия), так и химическому выветриванию. Совместное воздействие этих процессов приводит к разрушению породы. Причем степень деградации зависит не только от климатических



условий, но и от минералогических, химических особенностей и структуры породы. Также показано, что тепловое расширение мрамора зависит от типа и степени преимущественной ориентировки сильноанизотропных зерен кальцита [94].

Помимо кристаллографической текстуры на тепловые свойства мрамора влияют следующие факторы: дефекты структуры горной породы, величина зерен, распределения зерен по размеру, форма зерен, геометрия межзеренных границ и другие особенности текстуры формы. Образцы мрамора из Каррары, исследованные в работе [97], обнаружили сильную анизотропию теплового расширения, хотя кристаллографическая текстура этих образцов не является хорошо развитой и острой. Анизотропия этого мрамора обусловлена сильной зерновой текстурой формы и ориентировкой зерновых границ.

Авторами [96] для образцов мрамора из Каррары путем модельных вычислений коэффициента теплового расширения на основе восстановленных ФРО подтверждено, что пространственное распределение коэффициента теплового расширения в основном контролируется текстурой. Несовпадение модельных, рассчитанных только с учетом кристаллографической текстуры, и экспериментально измеренных значений коэффициента теплового расширения вызвано влиянием других структурных параметров и текстурой формы. На основании этого авторами делается вывод, что для понимания механизма деградации этих мраморов корреляции между кристаллографическими текстурами и тепловыми свойствами недостаточно.

Образцы кальцитосодержащих горных пород (подобных мрамору) часто обнаруживают сильную преимущественную ориентировку зерен. Кальцит достаточно пластичен по сравнению с другими минералами, поэтому кальцитосодержащие породы всегда являлись идеальной моделью для экспериментов по деформированию горных пород. Аномальное поведение физических свойств мрамора под влиянием внешнего нагружения и температур было обнаружено авторами [98, 99]. На основе дифракционных спектров рассчитаны микродеформационные и термические характеристики кальцита при разных температурах по изменению межатомных расстояний в кристаллической решетке кальцита в процессе механического нагружения и нагрева.

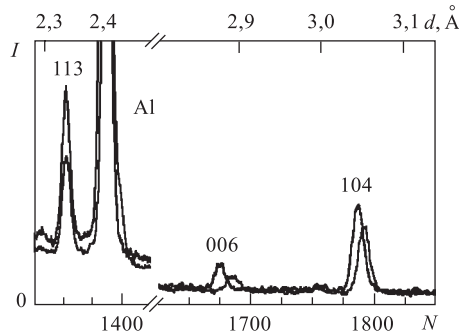


Рис. 8. Участки дифракционных спектров кальцита, зарегистрированные при температурах 20 и 220 °С

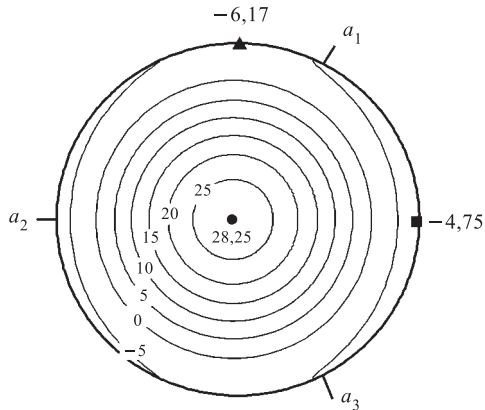


Рис. 9. Пространственное распределение коэффициента теплового расширения  $\alpha$  ( $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) монокристалла кальцита, рассчитанное по смещениям пиков (0006), (10 $\bar{1}$ 4) и (11 $\bar{2}$ 3) на дифракционных картинах.  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  — направления кристаллографических осей в кальците

дифракционные спектры позволили рассчитать пространственное распределение коэффициента теплового расширения  $\alpha$  на основе смещений и относительных деформаций различных межплоскостных расстояний кристаллической решетки кальцита (рис. 9). Максимальное значение главной компоненты тензора  $\alpha_{\max} = 28,25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Поскольку главная ось тензора практически совпадает с направлением нормали к плоскости (0006), разница между минимальным значением главной компоненты тензора  $\alpha_{\min} = -4,75 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  и промежуточным  $\alpha_{\text{int}} = -6,17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  указывает на экспериментальную ошибку, которая при расчете составила 5%.

**2.5. Исследование структуры, текстуры и свойств метеоритного вещества.** Вскоре после падения железного метеорита близ Стерлитамака (Башкирия) был проведен текстурный анализ его осколков [100]. Измеренные полюсные фигуры дали информацию о текстуре деформации, которая, вероятнее всего, образовалась при ударе сильно разогретого метеоритного тела о поверхность Земли.

Другим исследованием с применением нейтронной дифрактометрии для установления текстур в метеоритах, выполненным в ОИЯИ, является работа по обнаружению поврежденности треков быстрых тяжелых ядер. Постановка этой задачи связана с одним из фундаментальных научных направлений в ядерной физике — поиском трансурановых ( $Z > 114$ ) элементов в составе

Анизотропия коэффициента теплового расширения кальцита проявляется в различии компонент тензора по величине и по знаку. Интересен факт, что только кальцит и отавит имеют отрицательные компоненты тензора теплового расширения, тогда как остальные карбонаты обладают только положительными коэффициентами теплового расширения.

При возрастании температуры наибольшее смещение зарегистрировано у пика (0006). В температурном интервале (20–220 °С) оно составило  $1,79 \times 10^{-2} \text{ \AA}$ , что соответствовало линейной относительной деформации  $\Delta d/d = 6,20 \cdot 10^{-3}$  (рис. 8). Измеренные при различных температурах времяпролетные ди-

первичного космического вещества. В рамках этой проблемы ведутся работы по выявлению и анализу радиационных треков в оливинах из метеоритов.

В работах [101, 102] показано, что природные и синтетические ионные и ковалентные кристаллы обладают способностью регистрировать и сохранять микроскопические дефекты структуры, создаваемые в них при прохождении тяжелых заряженных частиц. В трековом анализе основными параметрами являются геометрические характеристики треков. Нейтронографический текстурный анализ таких объектов может дать обоснованное заключение о степени их пластической деформации и тем самым оценить достоверность результатов трекового анализа. В работе [103] на основе текстурного анализа осколков метеоритов Марьялахти и Eagle Station по полюсным фигурам установлено отсутствие текстуры деформации в оливиновой составляющей образцов. Интерпретация данных, основанная на известных физических механизмах образования текстур деформации в оливинитах, позволяет сделать вывод о хорошей сохранности треков в оливиновых кристаллах, образовавшихся при распаде ядер урановой группы.

Нейтронная дифрактометрия применялась для исследования обломков метеоритов с целью обнаружения двойникования и ориентационных соотношений между различными фазами. Ориентировка кристаллитов в метеоритах наблюдается после фазовых переходов в процессе охлаждения или после механического двойникования, вызванного ударом. Микроструктура трех железоникелевых метеоритов — двух шестигранников из Уолкер Кантри (Алабама) и Коахуила (Мексика) и одного восьмигранника из Гибсона (Намбия) — была проанализирована на основе анализа нейтронно-дифракционных полюсных фигур с очень плотной сканирующей сеткой, включающей 7651 различную ориентацию образца [104].

Для двух шестигранников были измерены полюсные фигуры ОЦК-камасита (т.е. объемноцентрированное  $\alpha$ -Fe с менее 6% Ni по массе). Наблюдались два типа максимумов полюсной плотности с различной интенсивностью. Объемное содержание двойников составляет ~ 6 и 8% для образцов из Уолкер Кантри и Коахуила соответственно, что было определено по соотношению интенсивностей монокристалла и двойника. В то время как метеорит из Коахуила характеризовался симметричными максимумами полюсной плотности на ПФ, у образца из Уолкер Кантри наблюдалось более асимметричное распределение максимумов с расплывчатыми уширениями. Полученные данные свидетельствовали о существовании нескольких кусочков камасита со слабыми различиями в ориентировке, образовавшимися из-за повреждений внутри метеорита.

В восьмиграннике из Гибсона были проанализированы ориентационные соотношения между таенитом  $\gamma$ -Fe с 30% Ni (по массе) и камаситом. Полюсные фигуры таенита показали, что таенитовые края имеют ориентировку исходного кристалла  $\gamma$ -фазы. Камаситовые полюсные фигуры характеризуются

группами и поясами с несколькими интенсивными максимумами. Ориентировка камаситовых пластинок и таенитовых ободов близка к соотношению Нишияма–Вассерманна ( $\{110\}_\alpha \parallel \{111\}_\gamma$ ,  $\langle 001 \rangle_\alpha \parallel \langle -110 \rangle_\gamma$ ). Прямо противоположная картина наблюдается у кристаллов камасита, что может быть объяснено влиянием деформации в процессе роста кристаллов.

Приведенные примеры нейтронных исследований метеоритного вещества скорее свидетельствуют об отсутствии концептуальной долгосрочной и комплексной программы применения нейтронографии в данной области науки. По-видимому, расширение возможностей использования методов нейтронной физики в космологии может быть реализовано при создании российских и международных коллабораций специалистов по строению и эволюции Солнечной системы, по метеоритам и нейтронной физике.

**2.6. Нейтронографические исследования структуры и полиморфных превращений в минералах и льдах.** Способность нейтронов глубоко проникать в вещество позволяет исследовать кристаллическую структуру при различных температурах, давлениях и других внешних воздействиях, что вместе с высоким разрешением нейтронного потока представляет исследователям ранее недоступные возможности. Большое преимущество нейтронографии перед рентгенографией — это лучшая способность определения положения легких атомов в присутствии тяжелых. Другое преимущество состоит в возможности исследования структур, содержащих атомы с близкими атомными номерами, почти не различимые рентгенографически. Примером могут служить соединения с элементами Ni, Fe, Co и др.

Нейтроннография обладает явным преимуществом для определения кристаллографических структур и переходных процессов в монокристаллах, помещенных в камеры, создающие разнообразные  $p$ - и  $T$ -условия. Особый характер взаимодействия нейтронов с веществом определяет типичный круг экспериментов на монокристаллах [105]: определение положения легких атомов и геометрии водородной связи (алюмосиликатные цеолиты); изучение распределения катионов между кристаллографическими позициями в минералах (альбит, натролит), что особенно важно для понимания физики и химии образования минералов. Все эти эксперименты продиктованы проблемами минералогической кристаллографии.

Можно привести несколько примеров нейтронных исследований структуры минералов и полиморфных образований при различных давлениях, а также при высоких и низких температурах [106]. К числу таких исследований можно отнести работу [107], выполненную на источнике ISIS по наблюдению структуры силикатных полиморфных состояний: HP-тридимит,  $\beta$ -кристаболит,  $\alpha$ -кристаболит,  $\beta$ -кварц,  $\alpha$ -кварц при различных температурах.

Влияние температуры и давления на структурные изменения, в частности на фазовые переходы типа упорядочение/разупорядочение, изучается ме-

тодами порошковой дифрактометрии [108]. Примером такого рода является эксперимент на кальците [109], когда проводилось наблюдение перехода типа упорядочение/разупорядочение при температуре 1260 К, сопровождавшегося изменением пространственной группы симметрии кальцита из  $R\bar{3}c$  в  $R\bar{3}m$ . Работа [110] посвящена изучению при высоком давлении структуры кристобалита, которая, как оказалось, соответствует искаженной структуре высокотемпературной кубической  $\beta$ -фазы.

Большой интерес представляют исследования, проведенные группой французских ученых в Институте Лауэ–Ланжевена (Гренобль) в начале 80-х гг. [111–114]. Результаты по брэгговскому рассеянию нейтронов получены в [111] на образце природного кварца с помощью дифрактометра D10. При охлаждении кварца из  $\beta$ -фазы наблюдалось слабое повышение диффузного рассеяния в окрестности брэгговского пика (301), затем при температуре  $T(\beta \rightarrow \alpha) + 1,5$  К это рассеяние становилось анизотропным и возникали два симметричных сателлитных пика, интенсивность которых увеличивалась линейно с изменением температуры. При температуре фазового перехода  $T(\beta \rightarrow \alpha)$  интенсивность сателлитов резко возрастала, что соответствовало переходу II рода в другую фазу. При этом появление промежуточной фазы в температурном интервале 1,3 К выше температуры  $T(\beta \rightarrow \alpha)$  полиморфного перехода подтверждалось измерением теплоемкости образца. Однако точность нейтронно-дифракционного эксперимента не позволила утверждать, появляются ли сателлитные пики точно при температуре перехода  $T(\beta \rightarrow \alpha)$  или же это какая-либо другая аномалия.

Позднее этими же авторами был поставлен более точный эксперимент (со стабилизацией температуры 0,02 К), представленный в работе [114], входящей в цикл статей, где сравниваются результаты, полученные методом упругого рассеяния нейтронов и электронной микроскопии. Нейтронные измерения выполнялись на объемном образце кварца (до нескольких см<sup>3</sup>) и сопровождались непрерывными измерениями теплового расширения.

В результате экспериментов было подтверждено, что фазовый переход  $\alpha$ -кварц– $\beta$ -кварц происходит с образованием несоизмеримой фазы (incommensurate phase), существующей в небольшом температурном диапазоне 1–2 К. Переход  $\beta$ -кварца в несоизмеримую фазу непрерывный, переход несоизмеримая фаза– $\alpha$ -кварц — это переход I рода. Также было отмечено увеличение интенсивности диффузного рассеяния нейтронов вблизи точки фазового перехода. Такой результат находится в согласии с теорией Ландау для монокристаллов, испытывающих фазовый переход II рода.

Необычное поведение  $\alpha$ -кварца при высоких давлениях стало объектом экспериментального исследования [115] с использованием синхротронной рентгеновской дифракции. Испытание проводилось на порошковых образцах и на образцах природного кварца в условиях статического сжатия. Было обнаружено, что с увеличением давления до значения 21 ГПа возникает мета-

стабильный переход в кварце типа кристаллит–кристаллит, наблюдаемый во время аморфизации. Этот переход рассматривался как промежуточная фаза в аморфизации по аналогии с несоразмерной фазой при высокотемпературном  $\alpha - \beta$ -переходе в кварце.

Для физики планет важны эксперименты по изучению фазовых переходов в молекулярном водороде и метане. Изучение молекулярного водорода  $H_2$  и других молекулярных систем —  $H_2O$ ,  $NH_3$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$  — представляет интерес при сверхвысоких давлениях, когда плотность вещества достаточно большая и возможно изменение типа химической связи. Предполагается, что при очень высоких давлениях молекулярный водород  $H_2$  переходит в металлическое состояние, а лед  $H_2O$  превращается в простой оксид с одинаковой длиной водородных связей  $H-O$ . В последнее время поиску этой формы льда уделялось большое внимание. Данные соединения являются основными компонентами коры других планет, особенно Урана и Нептуна. Поэтому структурные исследования этих веществ важны для понимания изменения характера межатомных взаимодействий при высоких плотностях вещества и для изучения строения и процессов, протекающих на других планетах.

Уравнение состояния молекулярного дейтерия  $D_2$  исследовалось на дифрактометре ДИСК на стационарном реакторе ИР-8 (РНЦ КИ, Москва) при давлениях до 310 кбар. Эксперименты проводились на монокристаллических образцах с использованием магнитных наковален. При сжатии  $D_2$  остается в исходной гексагональной плотноупакованной решетке, при этом соотношение параметров элементарной ячейки  $a/c$  близко к идеальному и слабо зависит от давления [116]. Полученное уравнение состояния довольно сильно отличается от результатов теоретических расчетов. Это свидетельствует о том, что оценки, даваемые теорией для давления металлизации водорода, далеки от реальных значений.

В настоящее время известно 12 модификаций льда, и его структура основательно исследовалась при давлениях до 3 ГПа [117]. Однако при более высоких давлениях информация о вариантах структуры льда поступала из нейтронографических измерений изменения расстояния  $O-O$  [118] и эмпирических соотношений между изменением расстояний  $O-O$  и  $O-H$ , полученных из исследований различных соединений при нормальном давлении.

Текстурные исследования вещества Луны, состоящего в основном из смеси горных пород и льда, требуются для восстановления ее планетарной истории. Понимание поведения льда при высоких давлениях и низких температурах является существенным для любого вида геологической или геофизической интерпретации.

Текстура поликристаллического льда II (полиморфная модификация высокого давления твердой формы воды, которая является стабильной примерно между 200 и 500 МПа и ниже 238 К, ромбоэдрическая структура кристалла), полученная в низкотемпературных экспериментах при высоком давлении и

одноосном сжатии, была изучена при температуре 77 К [119]. В двух дейтерированных образцах (один синтезирован при гидростатическом давлении и укорочен на 50% при 225 К, другой получен без гидростатического давления и укорочен на 7% при 195 К) полюсные фигуры, рассчитанные на основе ФРО, показывают, что *a*-оси выстраиваются по направлению сжатия. В полиморфной модификации льда I низкого давления, деформированной при низкой температуре, *c*-оси ориентируются параллельно направлению сжатия [11]. В экспериментах, поставленных в ИЛЛ, было доказано, что в образце недейтерированного льда также может быть измерена текстура и восстановлена ФРО, даже в случае сильного некогерентного рассеяния от водорода.

### 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ О ТЕКСТУРАХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

**3.1. Изучение метаморфических, геодинамических и эволюционных процессов по данным о текстурах многофазных глубинных образцов и их аналогов с поверхности.** Фундаментальной проблемой геологии является изучение на разных масштабных уровнях строения, закономерностей формирования и преобразования горных пород литосферы в процессе ее эволюции. Изучение закономерностей и механизмов образования текстур формы и кристаллографических текстур в горных породах в ходе магматических, тектонических и метаморфических процессов при изменяющихся термодинамических условиях в литосфере составляет одну из основных задач в рамках данного направления.

Исследование связей между особенностями текстур разных минеральных фаз в породах и физико-химическими механизмами метаморфизма и других эволюционных процессов позволит подойти к пониманию явлений, которые, с одной стороны, видоизменяют состав, свойства, состояние пород, а с другой — обеспечивают поразительную сохранность их отдельных свойств. Существенное продвижение

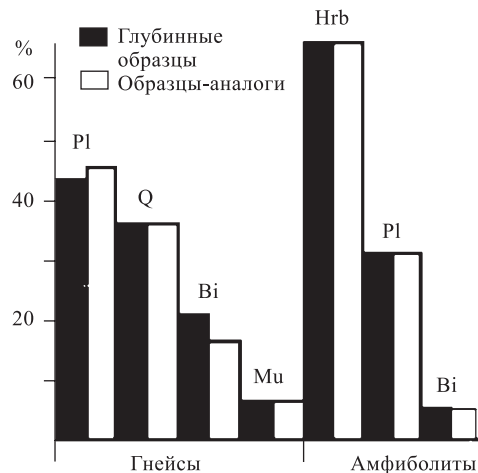


Рис. 10. Минеральный состав кольских образцов: Pl — плагиоклаз; Q — кварц; Bi — биотит; Mu — мусковит; Hrb — роговая обманка

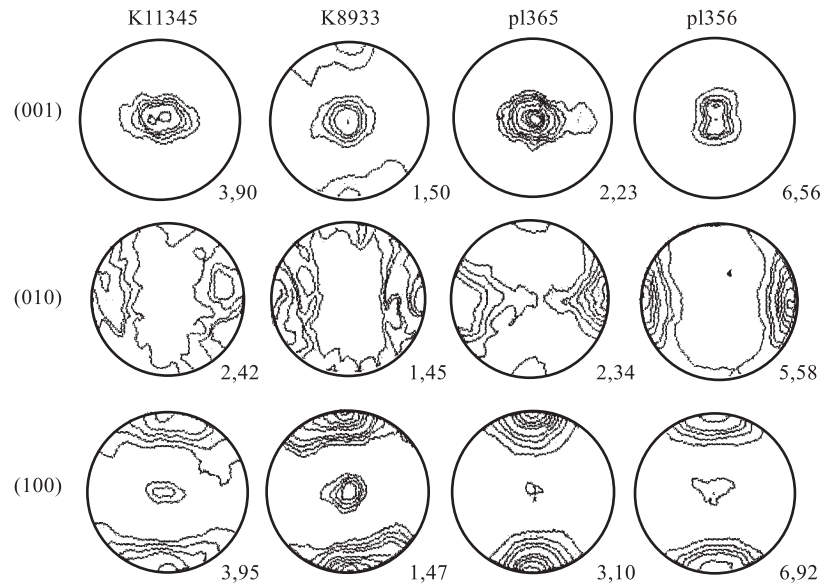


Рис. 11. Полусные фигуры роговой обманки образцов амфиболитов, рассчитанные на основе ФРО. К11345, К8933 — образцы из разреза Кольской сверхглубокой скважины; p1365, p1356 — образцы с поверхности участка Мустатунтури. Справа внизу указаны максимальные значения полюсной плотности в единицах, кратных хаотическому распределению

при решении подобных задач возможно в результате использования нейтронографического текстурного анализа, применяемого в комплексе с другими физическими и петрофизическими методами [4].

В данном разделе рассмотрены результаты комплексного исследования текстур амфиболитов и гнейсов из Кольской сверхглубокой скважины (глубина 8,5–11,5 км) и их аналогов с поверхности Печенгской геологической структуры, и сделана попытка проследить последовательность метаморфических процессов, вызвавших трансформацию текстур. Глубинные и поверхностные образцы характеризуются идентичным минеральным (рис. 10) и химическим составом и минеральной плотностью.

Измерения текстуры были осуществлены на коллекции из 20 образцов амфиболитов и гнейсов с помощью нейтронного текстурного дифрактометра СКАТ на импульсном реакторе ИБР-2 (ОИЯИ, Дубна).

Из набора экспериментальных полюсных фигур были восстановлены функции распределения ориентаций для преобладающих в процентном отношении минеральных фаз и на их основе рассчитаны полюсные фигуры базовых кристаллографических плоскостей (100), (010), (001) для роговой



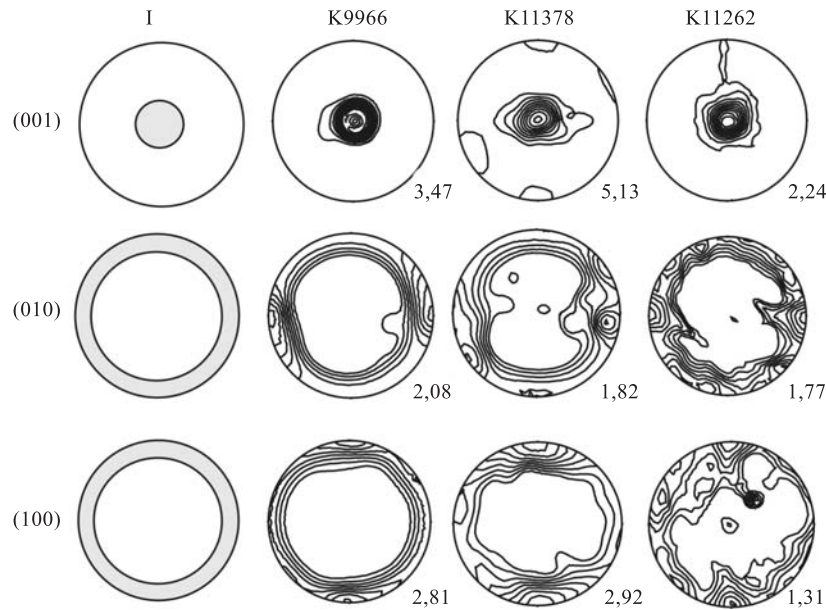


Рис. 12. Полюсные фигуры роговой обманки природных образцов амфиболитов K9966, K11378, K11262 из разных глубин Кольской сверхглубокой скважины. Для сравнения слева приведены идеальные полюсные фигуры роговой обманки для текстуры (тип I), образовавшейся в процессе магматического течения

обманки, плагиоклаза и биотита и плоскостей (0001),  $(11\bar{2}0)$  кварца. Результаты текстурного анализа указывают на наличие хорошо развитых текстур основных породообразующих минералов.

Анализ текстуры, обнаруженной у роговой обманки, а именно двух устойчиво воспроизводимых типов (рис. 11–13), позволяет сделать предположение о существовании двух этапов в образовании преимущественных ориентировок этой минеральной составляющей в амфиболитах. Для первого этапа характерны острые максимумы на полюсных фигурах (001) и поясное распределение полюсной плотности на ПФ (010) и (100) (рис. 12). Второму этапу соответствуют сильно коррелирующие максимумы основных кристаллографических плоскостей (001), (010) и (100) (рис. 13). Преимущественная ориентировка первого типа, по-видимому, образовалась в процессе магматического течения на более ранней стадии образования горной породы. Образование ориентировок в процессе магматического течения происходит за счет вращения жестких вытянутых кристаллитов в вязкой матрице породы. В сильнодеформированных образцах второго типа текстур возможным

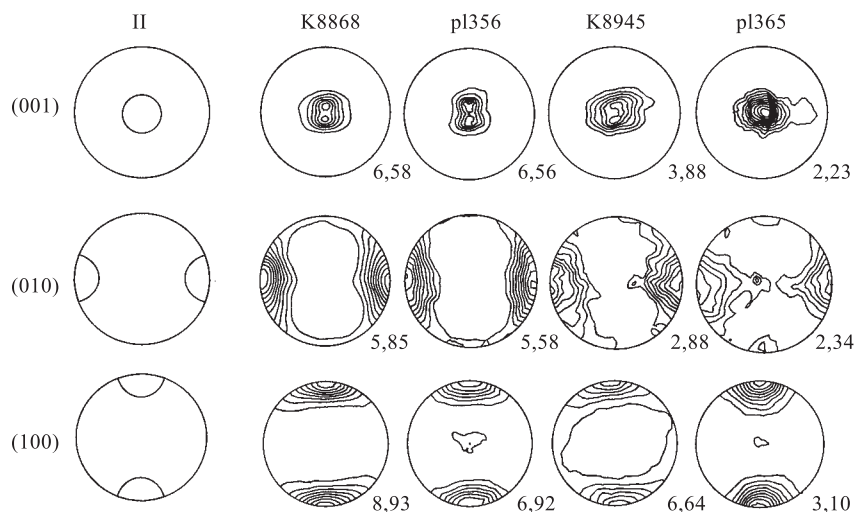


Рис. 13. Полюсные фигуры роговой обманки природных образцов амфиболитов K8868, K8945 из разных глубин Кольской сверхглубокой скважины и образцов-аналогов с поверхности p1356, p1365. Для сравнения слева приведены идеальные полюсные фигуры роговой обманки для текстуры (тип II), образовавшейся в процессе пластической деформации

механизмом образования является дислокационное скольжение зерен роговой обманки в направлении  $[001]$  по плоскостям  $(100)$ . Данная система скольжения в роговой обманке была установлена экспериментально при  $600\text{--}750^\circ\text{C}$  и всестороннем давлении 10 кбар. Из сравнения полюсных фигур роговой обманки образцов из Кольской сверхглубокой скважины и с поверхности (рис. 13) ясно, что в ходе эволюции коры текстура роговой обманки сохранила свою устойчивость, что, в свою очередь, свидетельствует об относительном постоянстве температурного режима в течение эволюционного периода.

То, что преимущественная ориентировка плагиоклаза (рис. 14) более слабая по сравнению с роговой обманкой, можно объяснить его большей податливостью к деформационным воздействиям и процессам метаморфизма. Интересно заметить, что на ПФ (100) всех образцов прослеживается тенденция к образованию пояса преимущественных ориентировок с сильным максимумом в центре ПФ. Но в совокупности с другими полюсными фигурами, обладающими поясами со слабыми, размытыми максимумами, наблюдаемая текстура плагиоклаза не может рассматриваться, например, только как результат пластического деформирования с механизмом дислокационного скольжения.

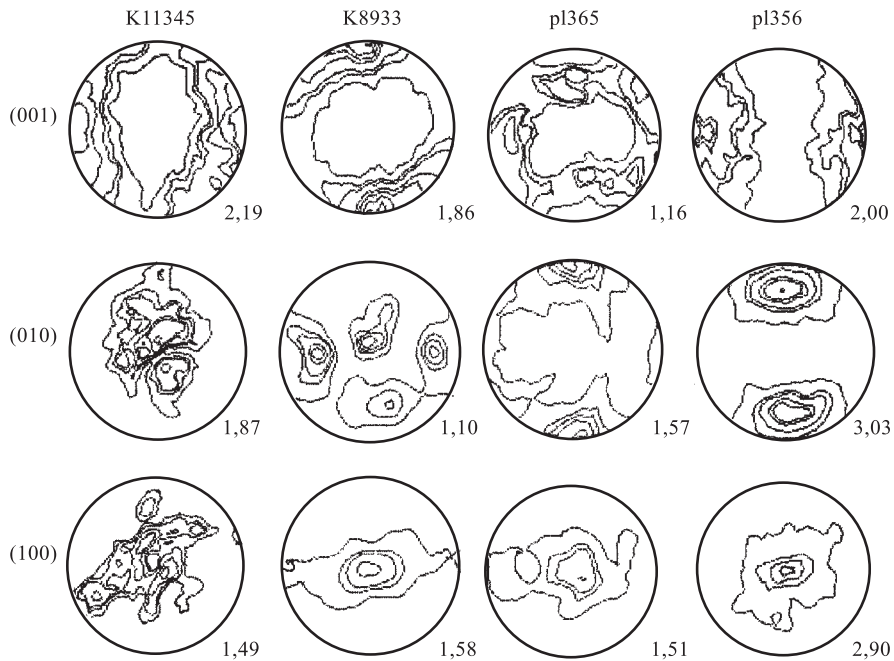


Рис. 14. Полюсные фигуры плагиоклаза образцов амфиболитов, рассчитанные на основе ФРО. K11345, K8933 — образцы из разреза Кольской сверхглубокой скважины; pl365, pl356 — образцы с поверхности участка Мустатунтури. Справа внизу указаны максимальные значения полюсной плотности в единицах, кратных хаотическому распределению

Тот факт, что плоскости пинакоида (001) плагиоклаза в образцах гнейсов и амфиболитов сохранили свою пространственную преимущественную ориентировку (рис. 14, 15), может свидетельствовать в пользу единого ориентационного механизма, создавшего плагиоклазовые текстуры и действовавшего на одном геологическом этапе. По всей вероятности, таким механизмом могло стать двойникование в условиях пластической деформации. Последующие метаморфические изменения в горной породе под влиянием меняющихся  $p$ ,  $T$ -параметров могли сильно трансформировать текстуру плагиоклаза, не разрушив, тем не менее, ее вообще и сохранив «память» о первоначальном этапе текстурообразования в виде схожих картин ориентировки на полюсных фигурах (001).

Взаимная ориентировка различных минеральных фаз в различных по минеральному составу горных породах, по-видимому, также может оказывать

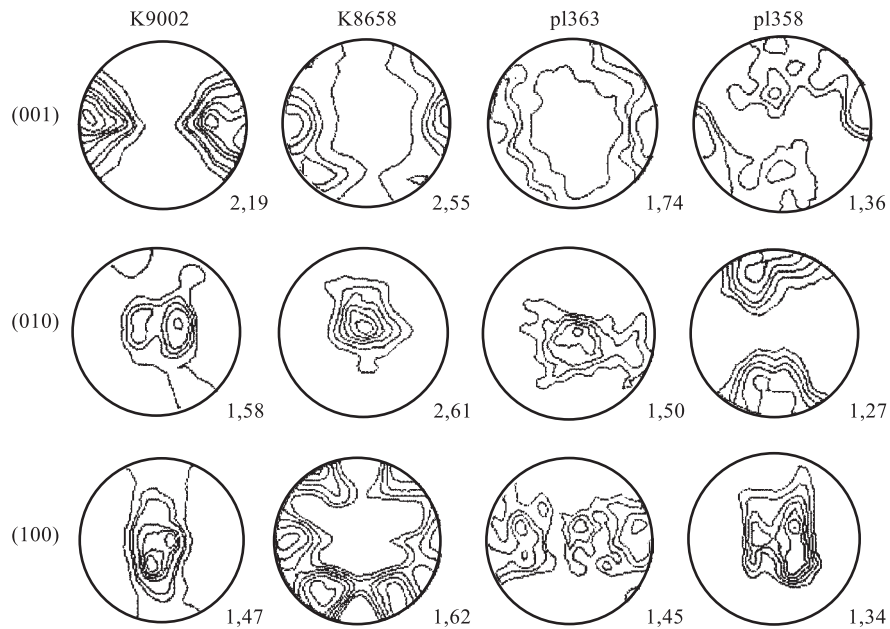


Рис. 15. Полосные фигуры плагиоклаза образцов гнейсов, рассчитанные на основе ФРО. K9002, K8658 — образцы из разреза Кольской сверхглубокой скважины; pl363, pl358 — образцы с поверхности участка Мустатунтури. Справа внизу указаны максимальные значения полюсной плотности в единицах, кратных хаотическому распределению

влияние на ход текстурных трансформаций минералов. Взаимодействие плагиоклаза с роговой обманкой — основным породообразующим минералом амфиболитов, сохранившим сильную преимущественную ориентировку, привело к нарушениям и даже к разрушению первичной ориентировки плагиоклаза в амфиболитах в большей степени (рис. 14), чем в гнейсах (рис. 15), что и отразилось на полюсных фигурах (001). Отсутствие ярко выраженных закономерных ориентировок на полюсных фигурах плагиоклаза может быть также свидетельством сильных рекристаллизационных процессов в ходе эволюции архейских амфиболитовых пород, которые в большей степени затронули плагиоклаз, чем роговую обманку.

Вследствие большого разнообразия кварцевых текстур, как в амфиболитах, так и в гнейсах (рис. 16), существуют большие трудности в трактовке механизмов и условий их образования.

Тем не менее текстурный анализ кварца как минеральной компоненты в многофазной горной породе содержит много дополнительной информации о

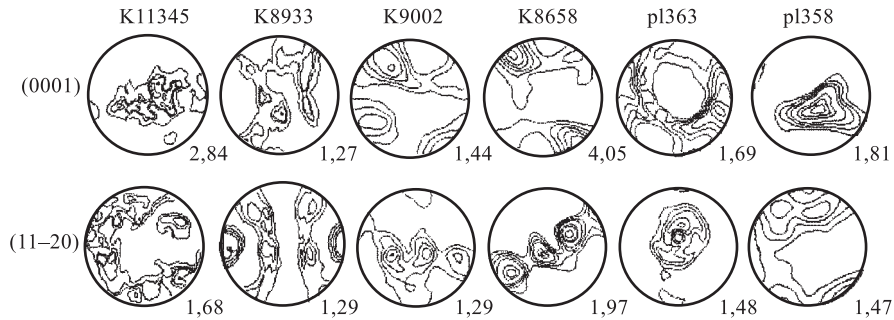


Рис. 16. Полусные фигуры кварца образцов амфиболитов (K11345, K8933) и гнейсов (K9002, K8658, p1363, p1358), рассчитанные на основе ФРО. Справа внизу указаны максимальные значения полюсной плотности в единицах, кратных хаотическому распределению

характере метаморфических процессов, влияющих на эволюцию исследуемых горных пород. Существует представление, согласно которому наблюдаемый, например на ПФ, первый (аксиальный) тип кварцевой текстуры может быть образован при пластической деформации в условиях плоской деформации, а второй тип ориентировки (униmodalный) указывает на образование ее при чистом сдвиге.

Наличие больших разновидностей текстур кварца, занимающего незначительный объем в образцах амфиболита, может быть следствием большого разнообразия генетических процессов в кварце, его полиморфизма, большей податливости к разнообразным метаморфическим механизмам. Последние трансформируют «реликтовые» текстуры кварца, возникшие на стадии образования амфиболитовой породы таким образом, что они могут быть полностью или частично перекрыты более поздними текстурами или, наоборот, размыты при охлаждении породы в результате фазового перехода и разных типов двойникования.

Проведенные исследования упругой анизотропии образцов амфиболитов сферической формы при высоких всесторонних давлениях методом пространственного измерения скоростей продольных волн [120] выявили следующие факты. Коэффициент анизотропии падает в диапазоне давлений 0,1–400 МПа для разных образцов в 2–6 раз. Этот факт можно объяснить разынтеграцией горной породы вследствие декомпрессии и резкого охлаждения при подъеме зерна на поверхность. Карты изолиний распределения скоростей упругих волн, отражающие характер анизотропии, во всем диапазоне давлений практически не меняются и определяются текстурой роговой обманки. Учитывая ранее установленный факт, что кристаллографические текстуры роговой об-

манки в амфиболитах с разных глубин и с поверхности практически идентичны, можно прийти к заключению, что текстура роговой обманки задает пространственно-временную систему координат для коры данного геологического региона, неизменную в течение длительного геологического периода. Это создает условия для применения метода реконструкции палеотектонического напряженного и деформированного состояния блоков литосферы, содержащих амфиболиты, по данным о текстурах и сейсмической анизотропии.

### **3.2. Реконструкция палеотектонических напряжений в блоках оливинитов по данным о текстурах горных пород и сейсмической анизотропии.**

Из лабораторных экспериментов, проведенных разными авторами, по деформированию оливиновых поликристаллов при различных температурах и давлениях известно, что в интервалах температур 600–900 °С, 900–1300 °С, 1300–1600 °С текстурообразование происходит в различных системах скольжения. Сопоставление ПФ «эталонных» образцов и ПФ, измеренных с помощью нейтронов, позволяет дать оценку глубин, на которых в оливините происходили деформационные, текстурообразующие процессы.

Экспериментальные работы разных авторов показали, что магматический расплав, который транспортирует ксенолиты наверх, не оказывает значительного влияния на их внутреннюю структуру и текстуру [121–124]. Многие исследователи придерживаются точки зрения, что внешняя форма ксенолитов предопределена тектоническими процессами, протекающими в верхней мантии, а тип текстуры — действовавшими полями напряжений [125–127]. Это дает основание использовать комплекс экспериментальных данных нейтронографического текстурного анализа и ультразвукового пространственного определения направлений максимальных и минимальных скоростей продольных упругих волн для реконструкции палеотектонического напряженно-деформированного состояния блоков литосферы Земли. В основу реконструкций могут быть положены экспериментальные данные о связи кристаллографических текстур оливина и тензора механических напряжений, полученные как при лабораторном деформировании образцов оливинитов при высоких давлениях и температурах, так и при анализе ориентировок зерен и внешних форм ксенолитов.

Установлено, что параллельно направлению удлинения ксенолитов, как правило, ориентируются главные кристаллографические оси [001] деформированных оливинов. Оси [010] ориентируются параллельно направлению максимального сжатия. Расположение осей [100] имеет общую тенденцию к ориентации параллельно оси наибольшего растяжения ксенолита.

Известны работы [128], в которых приведены результаты экспериментов по деформированию одноосным сжатием образцов синтетического дунита при температурах 1250–1300 °С и всесторонних давлениях 130–140 МПа. При этом в образцах возникала предпочтительная ориентировка оливина, при ко-

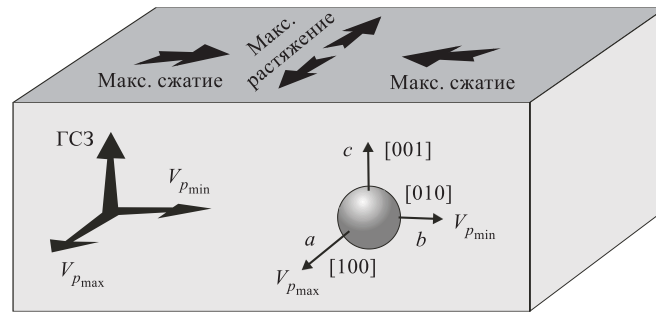


Рис. 17. Пример реконструкции напряженно-деформированного состояния блока литосферы Земли

торой [010] также ориентировалась вдоль оси сжатия, а [100] и [001] — в перпендикулярной ей плоскости.

На большой серии образцов было обнаружено [68], что система координат полюсных фигур, измеренных методом нейтронной дифракции, связана с системой координат упругого тензора (с направлением максимальной и минимальной скоростей упругих волн) образца. Значит, направления компонент тензора деформации могут быть определены в системе координат упругого тензора анизотропного образца, как, например, изображено на рис. 17.

Аналогично тому, как в амфиболитах, вышедших из нижних горизонтов коры на поверхность, реликтовая текстура роговой обманки сохранилась и в основном контролирует упругую анизотропию амфиболитов, очевидно, что в дунитах, вышедших из мантии, тип текстуры оливинитов практически не изменился. Следовательно, сейсмическая анизотропия блоков также претерпела небольшие изменения. Это позволяет применить в комплексе современное глубинное сейсмическое зондирование и полный текстурный анализ вынесенных на поверхность оливиносодержащих дунитов.

Таким образом, реконструкция палеотектонического напряженно-деформированного состояния в литосферном блоке, содержащем дуниты, предполагает:

- 1) оценку глубин образцов оливиносодержащих пород, вынесенных в разных регионах на поверхность, комплексом методов, в том числе с помощью нейтронного текстурного анализа;
- 2) определение возраста образцов;
- 3) определение направлений главных осей тензора упругих свойств с помощью ультразвука на сферических образцах;
- 4) определение пространственной ориентировки образца по совокупности данных лабораторных пространственных измерений скоростей упругих волн

и ориентировки главных векторов сейсмических волн в амфиболитовом или дунитовом блоке, установленной ГСЗ;

5) установление ориентировки главных осей тензора деформации (или напряжений) в системе координат тензора упругих свойств образца с использованием данных о текстурах, полученных с помощью нейтронной дифрактометрии.

**3.3. Реконструкция ориентировки главных осей тензора деформаций и напряжений на основе моделирования текстурообразования.** Связь между типами кристаллографических текстур горных пород и видом тензора механических напряжений исследовалась экспериментально [129] и теоретически [130, 131]. На основе этих представлений разработана методика реконструкции палеотектонического напряженно-деформированного состояния в блоках литосферы, под действием которого произошло текстурообразование в кварц-содержащих породах, а затем в какой-то степени была обеспечена консервация текстуры [132].

Развитие геофизических методов, фиксирующих крупные перемещения геологических масс, становится все более актуальным в связи с накоплением обоснованных аргументов в пользу (или вопреки) известного тезиса академика В. А. Магницкого: «Континенты и океаны, в общем, возникли примерно на тех местах, где они сейчас расположены» [133, 134]. С помощью текстурного анализа может быть получено экспериментальное подтверждение или опровержение представлений о дрейфе материков и разрастании океанического дна по реконструкции древнего напряженно-деформированного состояния в блоках земной коры. Реконструкция осуществляется путем сопоставления полюсных фигур, полученных при моделировании текстур в горных породах при различных вариациях процесса, с полюсными фигурами, измеренными экспериментально на ориентированно отобранных образцах разного возраста.

В основу моделирования текстурообразования положена модифицированная модель Тейлора, которая позволяет для заданного материала получать полюсные фигуры в системе координат главных осей тензора деформации.

При моделировании текстур [135] задаются условия деформации: температура, компоненты тензора и скорости деформации образца, степень результирующей деформации и число кристаллитов, по которым будет восстанавливаться модельная ФРО, а также параметры материала: системы скольжения, их критические напряжения сдвига, энергии активации, симметрия кристаллической решетки. Подробно процедура моделирования текстур при пластической деформации высокотемпературного кварца описана в работах [4, 83].

Приведем пример реконструкции палеодеформации для серий образцов жильного кварца, отобранных на одном из кварцеворудных месторождений золота. Образцы отбирались ориентированно с точной геологической привязкой, что позволило согласовать системы координат полюсных фигур с системой координат точек отбора образцов.



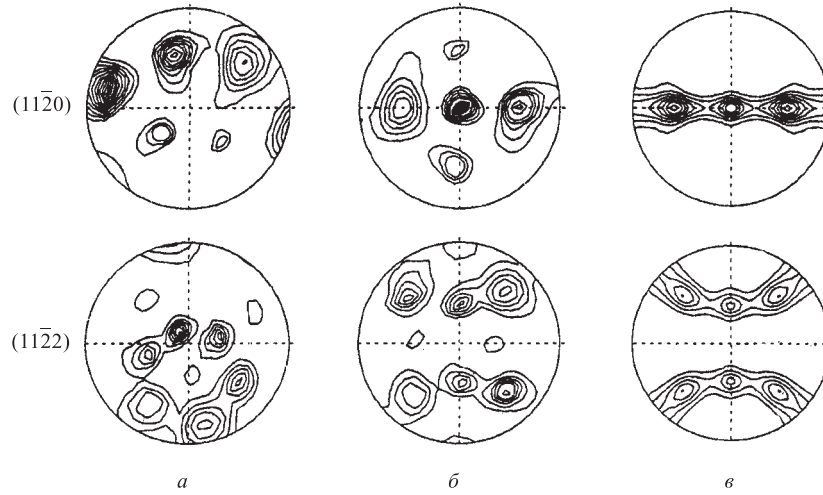


Рис. 18. Текстура жильного кварца: *а*) экспериментальные полюсные фигуры в лабораторной системе координат; *б*) после преобразования к вероятным главным осям тензора деформации; *в*) модельные полюсные фигуры для чистого сдвига

Измерения полюсных фигур образцов были проведены на нейтронном дифрактометре НСВР (ОИЯИ, Дубна). На рис. 18, *а* показаны две из девяти экспериментально измеренных ПФ:  $(11\bar{2}0)$  и  $(11\bar{2}2)$ . На полюсных фигурах отсутствуют пояса, характерные для текстуры при аксиальных схемах деформации. Это означает, что все главные деформации образца различаются, а в главных осях стационарной деформации симметрия полюсных фигур должна быть ромбической. Следовательно, одно и то же преобразование должно симметризовать все полученные полюсные фигуры, что выполнено на рис. 18, *б*. Таким образом, из соображений симметрии можно установить направление главных осей деформации. Чтобы установить относительные величины главных деформаций, необходимо сравнить экспериментальные данные с результатами компьютерного моделирования. На рис. 18, *в* приведены полюсные фигуры, полученные при моделировании чистого сдвига, при температуре  $600^\circ\text{C}$  со скоростью деформации  $10^{-10}\text{ с}^{-1}$ . Именно при этих параметрах обеспечивается наилучшее сравнение модели с экспериментом.

Вертикальное направление на стереографической проекции соответствует главной деформации растяжения, а перпендикулярно плоскости проекции действует сжимающая компонента. Можно отметить одинаковое положение максимумов полюсной плотности на экспериментальных и модельных полюсных фигурах. Имеющееся качественное сходство экспериментальных данных

с модельными позволяет с большой вероятностью интерпретировать палеодеформацию двух образцов жильного кварца как деформацию типа чистого сдвига.

Выявленные условия соответствуют пластическому протеканию кварца в твердофазной гексагональной модификации через канал узкой трещины. Таким образом, интерпретация экспериментальных данных нейтронографического анализа текстур у образцов в комплексе с данными компьютерного моделирования деформации позволяет осуществить реконструкцию схемы палеодеформаций горной породы.

**3.4. Нейтронографические исследования локальных и остаточных деформаций и напряжений в горных породах.** Достижения физики разрушения, и особенно целенаправленный лабораторный эксперимент сейсмологического типа, уже сейчас позволяют качественно объяснить полученные полевые результаты и открывают новые возможности для прогностических исследований.

В целом уровень развития теории разрушения и представления об очаге землетрясения, современные лабораторные эксперименты и полевые наблюдения позволяют начать создание теории подготовки процессов землетрясений [136, 137].

Очаг тектонического землетрясения есть динамический разрыв сплошности материала Земли, возникающий под действием напряжений, накопленных в процессе сдвиговых тектонических деформаций [138, 139]. Изучение процессов динамики и квазистатики развития и заживления разрывов составляет предмет физики очага землетрясений. Для понимания физики разрушения таких неоднородных и анизотропных материалов, какими являются горные породы, необходимо тщательно исследовать закономерности появления трещин, начиная с масштабного уровня кристаллических решеток минералов и разрыва межатомных связей в зернограничном материале [140].

Применение рассеяния нейтронов позволяет измерить микродеформации и напряжения в локальных объемах, а также исследовать напряженно-деформированное состояние внутри образца в трех направлениях.

Достоинства метода дифракции нейтронов настолько существенны, что в течение последних десяти лет во многих современных нейтронных центрах созданы специальные дифрактометры для изучения внутренних напряжений как на реакторах постоянной мощности в Гренобле, Ржеже и Берлине, так и на импульсных источниках нейтронов ISIS (Великобритания) и ИБР-2 (Дубна).

Измерения внутренних напряжений основываются на определении расстояния  $d$  между атомными плоскостями кристаллической решетки исследуемого материала по положению соответствующего брэгговского пика на спектре. Деформация решетки под воздействием напряжения приводит к сдвигу пика. Относительная величина сдвига (относительная деформация)

$\varepsilon = (d - d_0)/d_0$ , где  $d_0$  — межплоскостное расстояние в образце без внутренних механических напряжений, характеризует макроскопическую решеточную деформацию в направлении вектора рассеяния  $\mathbf{Q}$  нейтронов, перпендикулярного к плоскости (hkl).

В Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ начиная с 1997 г. на канале 7А ИБР-2 действует установка EPSILON для исследования локальных деформаций и напряжений. Благодаря длинной времяпролетной базе ( $\sim 102$  м) на спектрометре достигается хорошее спектральное разрешение.

В первоначальной конструкции спектрометр EPSILON имел два детектора с узкой диафрагмой, которые были установлены по разные стороны от образца на линии, перпендикулярной к падающему нейтронному лучу. Нейтронный дифрактометр EPSILON снабжен миниатюрной нагрузочной машиной EXSTRESS, создающей одноосное усилие на образцах в виде цилиндров в диапазоне 1–100 кН. Таким образом, на этой установке возможны измерения остаточных деформаций в ненагруженных образцах и локальных деформаций внутри образца при различных одноосных внешних нагрузках (0,1–1000 МПа).

Работа дифрактометра EPSILON протестирована на цилиндрическом образце мелового песчаника (кварц), который был продавлен через стальную трубу в течение 20 ч после извлечения, что позволило исследовать деформированные и релаксирующие части одного и того же образца [141]. Для двух взаимно-перпендикулярных радиальных направлений цилиндра объем кристаллической решетки оказался значительно меньше в зажатой части образца, чем в свободной. Несмотря на то, что результаты не имеют окончательной интерпретации, влияние и важность текстуры для поведения деформаций/напряжений в горных породах является очевидным.

В настоящее время дифрактометр EPSILON проходит стадию модернизации, целью которой является оптимизация нейтронно-дифракционных измерений для получения полного тензора деформации. Модернизированный EPSILON-MDS [142] включает 36 детекторов, расположенных по кольцу, причем угол рассеяния для всех детекторов  $2\Theta = 90^\circ$ . Это значит, что на дифракционных спектрах от каждого детектора все брэгговские рефлексии находятся в одинаковом положении, что является преимуществом новой детекторной системы. При этом достигается лучшее спектральное разрешение  $3 \cdot 10^{-3}$ .

Эксперименты по измерению деформаций на других реакторных источниках выполняются с помощью двухосного порошкового дифрактометра, который оснащен большими позиционно-чувствительными детекторами и специальным окружением образца.

К таким инструментам относятся дифрактометры E3 на реакторе BER-II в Институте Хана–Майтнер (Берлин), а также высокопоточный с перемен-

ным разрешением дифрактометр D20 в ILL (Гренобль). Эти инструменты используют для анализа остаточных напряжений в конструкционных материалах, когда требования к разрешению  $\Delta d/d$  меньше, чем это необходимо для анализа геоматериалов.

Лучшее разрешение может быть получено на импульсных источниках благодаря времяпролетному методу. Инструмент ENGIN по сканированию деформации установлен на испарительном источнике ISIS (Великобритания) и работает по времяпролетной методике.

**3.5. Нейтронографические исследования свойств горных пород при повышенных температурах и внешних нагрузках.** Наиболее перспективным направлением применения рассеянных нейтронов для исследования свойств геоматериалов является комбинирование текстурного анализа и измерений остаточных и решеточных деформаций в образцах. Значение таких измерений для решения геофизических проблем тем более возрастает, если они проводятся при разных (высоких) давлениях, температурах и внешних нагрузках.

Авторами [143] приводятся первые результаты измерений решеточных деформаций кристаллитов кальцита у образца мрамора, выполненные в ОИЯИ на специальной установке ТКОС (термоуправляемая камера одноосного сжатия) [97]. Камера ТКОС помещается в центре монтажного кольца спектрометра СКАТ таким образом, чтобы образец, подвергаемый нагреву и сжимающему усилию, был одновременно «видим» всеми девятнадцатью детекторами дифрактометра. Предельная температура для измерений в настоящее время составляет 650 °С. Существенной особенностью конструкции является возможность изменения температуры и деформирующего усилия (измерения этих параметров) на образце непосредственно в нейтронном пучке. Нейтронные измерения решеточных деформаций на одном и том же образце мрамора при воздействии только одноосного сжимающего усилия и при одновременном воздействии одноосного сжатия и температуры обнаружили разные картины изменения решеточных деформаций и напряжений [98].

Времяпролетные нейтронодифракционные спектры регистрировались на установке EPSILON при разных внешних напряжениях 25, 32 и 77 МПа без нагрева образца и на экспериментальном комплексе СКАТ-ТКОС при температурах 120, 220 °С и таких же по величине внешних напряжениях.

На рис. 19 представлены зависимости решеточных напряжений  $\sigma_{\text{lattice}}$  в образце мрамора от внешней сжимающей нагрузки  $\sigma_{\text{macro}}$ , рассчитанные для трех кристаллографических направлений  $(11\bar{2}3)$ ,  $(10\bar{1}4)$  и  $(21\bar{3}1)$ . При внешних сжимающих напряжениях –25, –32 и –77 МПа и комнатной температуре величины решеточных напряжений зависят от кристаллографического направления и во всех случаях они меньше внешних напряжений, прикладываемых к образцу. Это может быть объяснено тем, что мрамор является пористой горной породой и что при небольших нагрузках, действовавших в

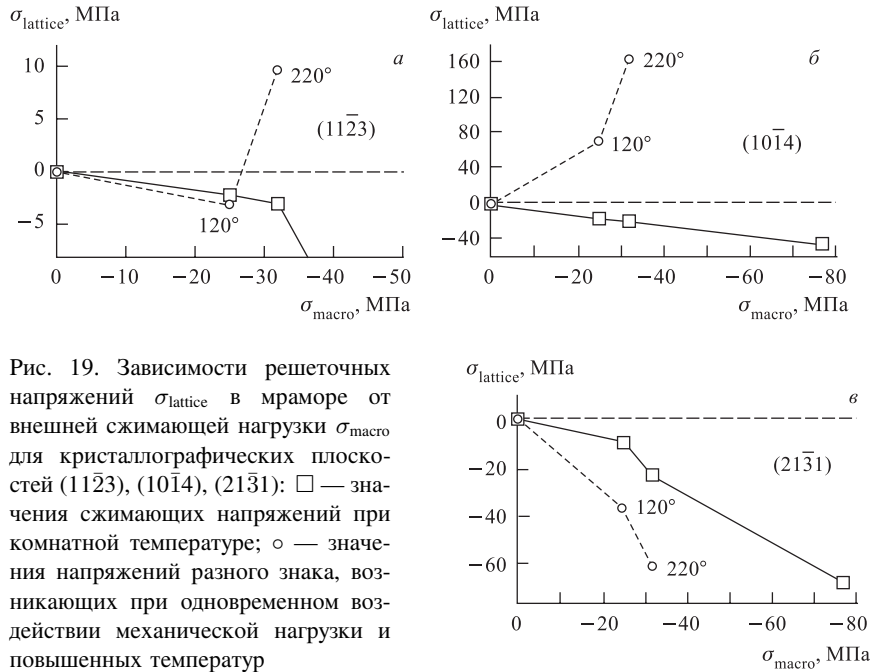


Рис. 19. Зависимости решеточных напряжений  $\sigma_{\text{lattice}}$  в мраморе от внешней сжимающей нагрузки  $\sigma_{\text{macro}}$  для кристаллографических плоскостей  $(11\bar{2}3)$ ,  $(10\bar{1}4)$ ,  $(21\bar{3}1)$ :  $\square$  — значения сжимающих напряжений при комнатной температуре;  $\circ$  — значения напряжений разного знака, возникающих при одновременном воздействии механической нагрузки и повышенных температур

опыте, деформация материала складывается из линейной составляющей кристаллической компоненты образца и нелинейной составляющей пористого пространства.

Другая картина наблюдается при одновременном воздействии механической нагрузки и тепла. Для тех же кристаллографических направлений  $(11\bar{2}3)$ ,  $(10\bar{1}4)$ ,  $(21\bar{3}1)$  решеточные напряжения сильно различаются и существенно превосходят напряжения, приложенные к торцам образца. Это различие увеличивается с ростом температуры.

Решеточное напряжение в направлении  $(10\bar{1}4)$  при температуре 220 °С и сжимающем напряжении -32 МПа достигает значения 162,4 МПа, что соизмеримо с пределом прочности мрамора (для разных мраморов предел прочности на сжатие  $\sigma$  лежит в интервале 180–300 МПа). В направлении  $(11\bar{2}3)$  напряжение  $\sigma_{\text{lattice}}$  с ростом сжимающей нагрузки и температуры меняет знак при 220 °С, а в направлении  $(10\bar{1}4)$  это происходит при более низкой температуре 120 °С.

Смену знака решеточных напряжений при непрерывном росте внешнего сжимающего усилия и повышении температуры можно объяснить разными знаками компонент тензора коэффициента теплового расширения кальцита,

т. е. тепловое расширение обуславливает деформацию со знаком «плюс» для некоторых кристаллографических направлений, и, как видно из эксперимента, в кристаллитах возникает деформация растяжения, противодействующая внешнему сжимающему усилию.

В работе [4] обсуждались причины и условия, при которых возможно возникновение больших локальных и решеточных напряжений в кристаллитах горной породы (мрамора). В проведенных опытах большие решеточные деформации не привели к тем напряжениям, которые рассчитаны по закону Гука, вследствие значительной концентрации пор. Текстурный эффект не играл здесь решающей роли, так как проведенный нейтронографический текстурный анализ образца выявил весьма слабую текстуру.

В ЛНФ ОИЯИ на измерительном комплексе СКАТ-ТКОС были проведены нейтронографические исследования образцов Шокшинского кварцита с целью изучения аномального поведения поликристаллического кварца при термодинамических условиях  $\alpha - \beta$ -перехода.

В ходе эксперимента температура повышалась от комнатной до 540 °С, затем после стабилизации происходил ее циклический подъем до 650 °С, при этом проводилась регистрация дифракционных спектров (в течение одного часа) для значений температуры 540, 580, 620 и 650 °С. По данным дифракционных спектров рассчитаны зависимости смещения дифракционных максимумов на спектрах, их интенсивности и ширины от температуры и внешней нагрузки. Получены также значения коэффициентов теплового расширения и решеточных напряжений для различных кристаллографических направлений (табл. 2).

Из эксперимента, проведенного на поликристаллическом кварце, следует, что фазовый переход в нем происходит плавно, без скачка, в температурном интервале 560–620 °С. Температурная зависимость интенсивности и ширины нейтронных дифракционных спектров при фазовом переходе в образце поликристаллического кварца отличается от предсказанной для монокристалла. Значения и поведение коэффициента теплового расширения указывают на существенное влияние температурного режима фазового перехода на физические характеристики кварцита. Оцененные значения решеточных напряжений при температурах фазового перехода значительно (в 2–7 раз) превосходят макронапряжения от приложенной к образцу механической нагрузки, однако сильно снижаются после полного перехода кварцита в  $\beta$ -фазу.

Результаты нейтронного дифракционного эксперимента на образце кварцита, проводившегося в интервале температур, близких к температуре фазового  $\alpha$ - $\beta$ -перехода в кварце, содержат выводы о резком уменьшении интенсивности рассеяния нейтронов и об аномальном изменении коэффициента теплового расширения и других физических свойств кварца. Высказано предположение о том, что подобное аномальное поведение горных пород в условиях относительно невысоких давлений и температур может быть источником

Таблица 2. Оценочные значения решеточных напряжений  $\sigma_{\text{lattice}}$  зафиксированных макронапряжений  $\sigma_{\text{macro}}$

(hkl)	T, °C	$\Delta d/d, 10^3$	E, ГПа	$\sigma_{\text{lattice}}$ , МПа	$\sigma_{\text{macro}}$ , МПа
(10 $\bar{1}$ 1)	540	0,72	79,0	56,9	-25
			87,5	63,0	
	580	1,23	74,0	91,0	-26
			82,0	100,9	
	620	0,85	106,5	90,5	-27
112,0			95,2		
650	0,37	114,0	42,2	-27	
		121,5	45,0		
(10 $\bar{2}$ 0)	540	0,60	79,0	47,4	-25
			87,5	52,5	
	580	0,83	74,0	61,4	-26
			82,0	68,1	
	620	1,01	106,5	107,6	-27
112,0			113,1		
650	0,16	114,0	18,2	-27	
		121,5	19,4		

сильных концентраций локальных напряжений, приводящих к возникновению локальных деформаций и микротрещин.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как уже отмечалось во введении, применение новейших достижений современной физики позволяет получать совершенно оригинальные данные для решения фундаментальных проблем в науках о Земле. Методы нейтронной физики открывают недоступные ранее возможности в лабораторных исследованиях геологических материалов, поскольку позволяют моделировать поведение горных пород в широком интервале температур и давлений, развивая междисциплинарные связи таких направлений в науках о Земле, как тектоника, петрология, теория сейсмической анизотропии, физика очага землетрясений и др. При этом прослеживается взаимосвязь между исследованиями по физике конденсированного состояния и актуальными исследованиями горных пород, минералов, осколков метеоритов и льдов, проводимыми методами нейтронографии.

Определяющим фактором, повлиявшим на развитие нейтронных исследований структуры, текстуры, свойств горных пород, переходных процессов и макронапряжений в геоматериалах, является создание и применение в ис-

следовательских целях мощных источников нейтронов. В России практически все исследования по геологии и геофизике с использованием рассеянных нейтронов сконцентрированы на пучках реактора ИБР-2 в ОИЯИ. Реактор ИБР-2 был принят в эксплуатацию в феврале 1984 г. За 20 лет работы реактора был создан уникальный комплекс спектрометров, накоплен большой опыт работы на выведенных пучках. С дифрактометрии начала развиваться экспериментальная техника и методика исследований твердого тела на импульсных источниках. Так, комплекс из трех дифрактометров HCBP, SKAT, EPSILON-MDS создан с учетом специфики нейтронных исследований горных пород и ориентирован на различные эксперименты, результаты которых должны использоваться при решении задач геологии и геофизики.

Большое влияние на развитие нейтронографических исследований текстур глубинных горных пород оказали результаты исследования древних структурно-вещественных неоднородностей земной коры и их роли в формировании полей напряжений и деформаций на последующих стадиях тектонической эволюции [144, 145]. При этом создана принципиально новая модель строения и геодинамической эволюции коры северо-запада Кольского полуострова. Выделены локальные сдвиговые зоны, выраженные высокотемпературными тектонитами амфиболитовой фации со структурно-кинематическими признаками. Такие кинематические инверсии отражают многократную перестройку полей напряжений и деформаций, что нашло отражение в характере распределения трещиноватости и направленности перемещений по отдельным системам трещин, а также в избирательности минерализации. Анализ геологических и тектонофизических данных позволяет сделать вывод не только о периодической переиндексации сил растяжения и сжатия, но и о вращении во времени сил внешнего воздействия на рассматриваемый объем коры. Изучение механизмов текстурообразования в горных породах расширит возможности для палеореконструкций, поскольку кристаллографические текстуры являются одним из унаследованных свойств горных пород, и исследование данного вопроса в ЛНФ ОИЯИ смыкается с исследованиями, проводимыми в ИФЗ РАН группой В. Н. Шолпо.

Проблема развития моделей очага землетрясения и построения физической теории подготовки землетрясения требует различных подходов. Цель может быть достигнута с помощью рассмотренных в обзоре экспериментов по установлению закономерностей между микро- и макронапряжениями при повышенных температурах и давлениях в совокупности с данными сейсмологии и физики разрушения горных пород. Совместные работы в этом направлении ведутся с учеными научной школы России «Физика очага землетрясений», возглавляемой Г. А. Соболевым [4, 140].

Работы, относящиеся к исследованию зарождения разрушения в геоматериалах, можно считать теоретическим обоснованием нейтронографических исследований локальных деформаций и микронапряжений в горных породах.



Экспериментально проверяемым может быть теоретическое представление, что в упругопластических геоматериалах при стеснении локализационная неустойчивость является единственно возможной формой первичной неустойчивости и что она существенно отличается от традиционной локализации сдвига/растяжения в тонких слоях.

Необходимо отметить перспективы практического применения полученных результатов.

Изучение изменений физических свойств горных пород под воздействием температур, механических напряжений и радиоактивных излучений, а также закономерностей взаимодействия текстур формы и кристаллографических текстур, влияющих на направления движений флюидов в коре, является актуальным в связи с проблемой выбора оптимальных материалов и мест для строительства хранилищ радиоактивных и химических отходов и оценки риска хранения отходов на больших глубинах.

Новые данные о свойствах горных пород-пьезоэлектриков и понимание физических механизмов образования пород с пьезоэлектрическими свойствами позволят кардинально модернизировать пьезоэлектрический метод геофизической разведки золотосодержащих рудных тел и повысить эффективность этого метода [146].

Установлено, что при бурении сверхглубоких скважин ствол скважины отклоняется от вертикали. Такая тенденция проявляется как минимум у семи сверхглубоких скважин. Этот факт может быть обусловлен влиянием упругой и прочностной анизотропии горных пород в естественном залегании [147]. В связи с этим представляется актуальным использование нейтронографических экспериментальных данных о текстурах и анизотропии аналогов глубинных горных пород при проектировании места закладки и технологии бурения новых сверхглубоких скважин [148].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нозик Ю. З., Озеров Р. П., Хенниг К. Нейтроны и твердое тело. Структурная нейтронография. М., 1979. Т. 1. С. 343.
2. Озеров Р. П. // Поверхность. 1997. № 7. С. 8.
3. Аксенов В. Л. // ЭЧАЯ. 2000. Т. 31, вып. 6. С. 1303.
4. Соболев Г. А., Никитин А. Н. // ЭЧАЯ. 2001. Т. 32, вып. 6. С. 1359.
5. Skrotzki W. Textures of geological materials / Eds. H.-J. Bunge et al. DGM Press, 1994. P. 167.
6. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. М.: Мир, 1972. 408 с.
7. Sachs G. Z. // Ver. Dtsch. Ing. 1928. V. 72. P. 734.
8. Taylor G. I. // J. Instr. Meth. 1938. V. 62. P. 307.
9. Wenk H.-R. Preferred orientation in deformed metals and rocks: An introduction to modern texture analysis. Orlando, Academic Press, 1985. 610 p.

10. *Вассерман Г., Гревен И.* Текстуры металлических материалов. М., 1969. С. 653.
11. *Kocks U. F., Tomé C. N., Wenk H.-R.* Texture and anisotropy. Cambridge University Press, 1998. P. 676.
12. *White H.* // Tectonophysics. 1977. V. 39. P. 143.
13. *Никитин А. Н.* Анизотропия и текстуры материалов: Курс лекций. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 260 с.
14. Тектонофизика и механические свойства горных пород. М.: Наука, 1971. 195 с.
15. *Воларович М. П.* Современные проблемы механики горных пород. Л., 1972. 250 с.
16. *Воларович М. П. и др.* Физико-механические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах. М.: Наука, 1974. 222 с.
17. *Hadley K.* // J. Geophys. Res. 1976. V. 81, No. 20. P. 3484.
18. *Kranz R. I.* // Tectonophysics. 1983. V. 100, Nos. 1–3. P. 449.
19. *Салганик Р. Л.* // Изв. АН СССР. МТГ. 1973. Т. 4. С. 149.
20. *Petrov V. A., Vladimirov V. I., Orlov A. N.* // phys. stat. sol. 1970. V. 42. P. 197.
21. *Чекин Б. С.* // Изв. АН СССР. Сер. «Физика Земли». 1970. Т. 4. С. 13.
22. *Калинин В. А., Баяк И. О.* // Докл. РАН. 1994. Т. 338, № 3. С. 390.
23. *Никитин А. Н., Архипов И. К.* // Физика Земли. 1992. Т. 12. С. 29.
24. *Баяк Е. И., Воларович М. П., Левитова Ф. М.* Упругая анизотропия горных пород при высоких давлениях. М.: Наука, 1982. 169 с.
25. *Karato S.-I.* Research in mineral physics. Orlando, 1987. P. 455.
26. *Александров К. С., Продайвода Г. П.* Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 354 с.
27. *Price G. P.* // Am. J. Sci. 1973. V. 273. P. 523.
28. *Heilbronner P., Pauli C.* // J. Struct. Geol. 1993. V. 15. P. 369.
29. *Федоров Е. С.* Теодолитный метод в геологии и петрографии. СПб., 1893.
30. *Kruhl J. H.* // N. Jb. Miner. Abh. 1987. V. 157. P. 185.
31. *Benn K., Mainprice D.* // Comp. Geosci. 1989. V. 12. P. 1127.
32. *Sander B.* // Jahrb. Geol. Bundes Anstalt. A. 1923. V. 23. P. 215.
33. *Holt D. B. et al.* Quantitative scanning electron microscopy. N. Y.: Academic Press, 1974.
34. *Lloyd G. E.* Textures of geological materials. DGM press, 1994. P. 93.
35. *Schmidt N.-H., Olesen N. O.* // Canad. Miner. 1989. V. 27. P. 15.
36. *Adams B. L., Wright S. I., Kunze K.* // Metall. Trans. A. 1993. V. 24. P. 819.
37. *Wenk H.-R. et al.* // J. Struct. Geol. 1984. V. 6. P. 687.
38. *Ullemeyer K. et al.* // Struct. Geol. 2000. V. 22. P. 1541.
39. *Schafer W.* // Eur. J. Miner. 2002. V. 14. P. 263.
40. *Лобанов К. В. и др.* // Петрология. 2002. Т. 1. С. 30.
41. *Chateigner D., Wenk H.-R., Pernet M.* // Textures Microstruct. 1999. V. 33. P. 35.
42. *Wenk H.-R., Matthies S., Lutterotti L.* // Mat. Sci. Forum. 1994. V. 157–162. P. 473.
43. *Lutterotti L. et al.* // J. Appl. Phys. 1997. V. 81. P. 594.

44. *Bunge H. J.* Texture analysis in material science. Mathematical methods. London: Butterworth, 1982. 330 p.
45. *Matthies S.* // phys. stat. sol. b. 1979. V. 92. P. K135.
46. *Matthies S., Vinel G. W., Helming K.* Standart distribution in texture analysis. Berlin, 1987–1989. P. 1–3.
47. *Виглин А. С.* // ФТТ. 1960. Т. 2, вып. 10. С. 2463.
48. *Roe R. J.* // J. Appl. Phys. 1965. V. 36, No. 6. P. 2024.
49. *Bunge H. J.* // Z. Metalkunde. В. 1965. V. 56, No. 2. P. 872.
50. *Савелова Т. И.* // Заводская лаб. 1984. Т. 50, вып. 5. С. 48.
51. *Савелова Т. И., Бухарова Т. И.* Представление группы  $SU(2)$  и ее применение. М.: МИФИ, 1996.
52. *Nikolayev D. I., Savyolova T. I., Feldman K.* // Textures Microstruct. 1992. V. 19. P. 9.
53. *Vucharova T. I., Savyolova T. I.* // Textures Microstruct. 1993. V. 21. P. 161.
54. *Хелминг К.* // Физика Земли. 1993. Т. 3. С. 73.
55. *Helming K., Eschner T.* // Cryst. Res. Tech. 1990. V. 25. P. K203.
56. *Brokmeier H.-G. et al.* // Mat. Sci. Forum. 1998. V. 273–275. P. 277.
57. *Wenk H.-R. et al.* // Tectonophysics. 1986. V. 126. P. 271.
58. *Gildiyal H., Jansen E., Kirfel A.* // Textures Microstruct. 1999. V. 31. P. 239.
59. *Will G. et al.* // Advances in X-Ray Analysis. 1990. V. 33. P. 277.
60. *Jansen E. M. et al.* // Textures Microstruct. 1992. V. 19. P. 203.
61. *Ullemeyer K. et al.* // Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A. 1998. V. 412, No. 1. P. 80.
62. *Feldmann K. et al.* // Textures Microstruct. 1991. P. 14–18. P. 59.
63. *Ivankina T. I. et al.* // Proc. of ICOTOM-12. Ottawa, 1999. V. 2. P. 1587.
64. *Вальтер К. и др.* // Физика Земли. 1993. Т. 6. С. 37.
65. *Schäfer W. et al.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 1995. V. 364. P. 179.
66. *Bennet K., von Dreele R. B., Wenk H.-R.* // Proc. of ICOTOM-12. Ottawa, 1999. Т. 1. С. 29.
67. *Иванкина Т. И. и др.* // Физика Земли. 1999. Т. 5. С. 29.
68. *Никитин А. Н. и др.* // Физика Земли. 2001. Т. 1. С. 64.
69. *Simmons G., Wang H.* Single crystal elastic constants and calculated aggregate properties: Handbook. Cambridge, Massachusetts, 1971. 370 p.
70. *Pros Z.* High pressure and temperature studies of physical properties of rocks and minerals. Kiev: Naukova Dumka, 1977. 56 p.
71. *Locajicek T. et al.* Intern. Conf. «Textures and Physical Properties of Rocks». Gottinger arbeiten zur geologie und palaontologie. Gottingen, 1999. V. 2. P. 114.
72. *Воларович М. П., Пархоменко Э. И.* // Докл. АН СССР. 1954. Т. 90, вып. 2. С. 239.
73. *Шубников А. В.* Пьезоэлектрические текстуры. М.; Л., 1946. С. 99.
74. *Никитин А. Н. и др.* // Изв. АН СССР. Сер. «Физика Земли». 1981. Т. 12. С. 36.
75. *Никитин А. Н., Пархоменко Э. И.* // Изв. АН СССР. Сер. «Физика Земли». 1982. Т. 2. С. 30.
76. *Вальтер К. и др.* // Изв. АН СССР. Сер. «Физика Земли». 1990. Т. 11. С. 78.
77. *Ivankina T. I. et al.* // Textures & Microstructures. 1991. V. 14–18. P. 421.

78. Tuck G., Stacy F. D., Starkey K. // *Tectonophysics*. 1977. V. 39. P. T17.
79. Bishop J. R. // *Tectonophysics*. 1981. V. 77. P. 297.
80. Ghomshei M. M., Templeton T. L. // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1989. V. 55. P. 374.
81. Nikitin A. N., Ivankina T. I. // *Textures Microstruct.* 1995. V. 25. P. 33.
82. Никитин А. Н. // *Физика Земли*. 1996. Т. 10. С. 15.
83. Вальтер К. и др. // *Физика Земли*. 1993. Т. 6. С. 45.
84. Hrouda F. // *Geophys. Surv.* 1982. V. 5. P. 37.
85. Uyeda S. et al. // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 68. P. 279.
86. Hrouda F. et al. // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 56. P. 174.
87. Hrouda F., Schulmann K. // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. V. 63. P. 71.
88. Siemens H. et al. // *J. Struct. Geol.* 2000. V. 22. P. 1747.
89. Rochette P. // *J. Struct. Geol.* 1987. V. 9. P. 1015.
90. Siegesmund S., Ullemeyer K., Dahms M. // *J. Struct. Geol.* 1995. V. 17. P. 1601.
91. Асанидзе Б. З., Ломидзе А. В., Печерский Д. М. // Сб. тр. конф. «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М., 2001. Вып. 7.
92. De Wall H., Bestmann M., Ullemeyer K. // *J. Struct. Geol.* 2000. V. 22. P. 1761.
93. Siegesmund S. *Textures of geological materials*. DGM press, 1994. P. 353.
94. Siegesmund S. et al. // *Intern. J. Restor. Build. Monum.* 1997. V. 3. P. 269.
95. Siegesmund S. et al. // *Intern. J. Earth. Sci.* 2000. V. 89. P. 170.
96. Leiss B., Weiss T. // *J. Struct. Geol.* 2000. V. 22. P. 1737.
97. Widhalm C., Tshegg E., Eppensteiner W. // *J. Perform. Const. Facilit. ASCE*. 1996. V. 10. P. 5.
98. Ivankina T. I. et al. // *Schr. f. Geowiss.* 1998. V. 6. P. 49.
99. Иванкина Т. И. и др. // *Физика Земли*. 2001. Т. 1. С. 50.
100. Helming K., Nikitin A. N., Walther K. // *Textures Microstruct.* 1991. V. 14–18. P. 279.
101. Young D. // *Nature*. 1958. V. 182. P. 357.
102. Silk E. C., Barnes R. S. // *Phil. Mag.* 1959. V. 4. P. 970.
103. Никитин А. Н., Перельгин В. П., Буриличев Д. Е. // *Изв. Тульск. гос. ун-та. Сер. «Физика»*. 1999. Т. 2. С. 3.
104. Höfler S., Will G., Hamm H.-M. // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1988. V. 90. P. 1.
105. Artioli G. // *Eur. J. Miner.* 2002. V. 14. P. 233.
106. Dove M. T. // *Ibid.* P. 203.
107. Keen D. A., Dove M. T. *The Rutherford Appleton Laboratory ISIS Facility Annual Report*. 1998. P. 44.
108. Pavese A. // *Eur. J. Miner.* 2002. V. 14. P. 241.
109. Dove M. T., Powell B. M. // *Phys. Chem. Minral.* 1989. V. 16. P. 503.
110. Dove M. T. et al. // *Minral. Mag.* 2000. V. 64. P. 569.
111. Dolino G., Bachheimer J. P., Zeyen C. M. E. // *Sol. St. Commun.* 1983. V. 45, No. 3. P. 295.
112. Dolino G. et al. // *J. Physique.* 1984. V. 45. P. 361.
113. Berge B. et al. // *J. Physique.* 1984. V. 45. P. 715.

114. Dolino G. et al. // J. Physique. 1984. V. 45. P. 901.
115. Kingma K. J. et al. // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 70. P. 25; 3927.
116. Глазков В. П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 47. С. 661.
117. Whalley E., Davidson D. W., Heath J. B. R. // J. Chem. Phys. 1968. V. 48. P. 2362.
118. Hemley R. J. et al. // Nature. 1987. V. 330. P. 737.
119. Bennet K. et al. Textures of geological materials. DGM press, 1994. P. 251.
120. Nikitin A. N. et al. // Физика Земли. 2001. Т. 1. P. 41.
121. Грачев А. Ф., Николайчик В. В., Трубицын В. П. // Докл. АН СССР. 1985. Т. 285, вып. 6. С. 1433.
122. Грачев А. Ф., Добржинская Л. Ф. Глубинные ксенолиты и строение литосферы. М., 1987. С. 178.
123. Dal Negro A. et al. // Contr. Miner. Petrol. 1984. V. 86. P. 221.
124. Eales H. V., Marsh J. S. // Chem. Geol. 1998. V. 38. P. 57.
125. Поляков А. И. // Глубинные ксенолиты и строение литосферы. М., 1987. С. 31.
126. Друбецкой Е. Р., Грачев А. Ф. // Там же. С. 54.
127. Киселев А. И. и др. // Там же. С. 64.
128. Nicolas A., Boudier F., Boullier A. M. // Am. J. Sci. 1973. V. 273. P. 853.
129. Kern H. // Tectonophysics. 1977. V. 39, Nos. 1–3. P. 103.
130. Соболев Г. А., Демин В. Н. Механоэлектрические явления в Земле. М.: Наука, 1980. 215 с.
131. Никитин А. Н., Иванкина Т. И. // Изв. АН СССР. Сер. «Физика Земли». 1986. Т. 3. С. 48.
132. Никитин А. Н., Иванкина Т. И., Успенская А. Б. // Докл. АН СССР. 1991. Т. 318, вып. 1. С. 168.
133. Магницкий В. А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1979. 379 с.
134. Авсюк Ю. Н. // Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы: Сб. М., 2002. С. 3.
135. Куртасов С. Ф. // Заводская лаб. 1993. Т. 59, вып. 11. С. 31.
136. Райс Дж. Механика очага землетрясения. М.: Мир, 1982. 217 с.
137. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 263 с.
138. Костров Б. В. Механика тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 150 с.
139. Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 312 с.
140. Соболев Г. А. и др. // Физика Земли. 2001. Т. 1. С. 6.
141. Scheffzük Ch., Frischbutter A., Walther K. // Schr. f. Geowiss. 1998. V. 6. P. 39.
142. Walther K., Frischbutter A., Scheffzük Ch. // II German-Russian User Meeting «Condensed Matter Physics with Neutrons at IBR-2», Dubna, April 21–25, 2001. P. 6.
143. Ivankina T. I. et al. // High Pres. Res. 2000. V. 17. P. 335.
144. Шолло В. Н. Геодинамика и развитие тектоносферы. М., 1991. С. 124.
145. Шолло В. Н. Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы М., 2002. С. 49.
146. Никитин А. Н., Иванкина Т. И., Успенская А. Б. // Изв. вузов. Сер. «Геология и разведка». 1990. Т. 5. С. 112.
147. Babuska V., Cara M. Seismic anisotropy of the Earth. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publishers, 1991. 218 p.
148. Губерман Д. М. и др. // Разведка и охрана недр. 2003. Т. 6. С. 38.