

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

14-2002-207

На правах рукописи
УДК 538.91, 538.95,
551.25, 550.85

БУРИЛИЧЕВ
Дмитрий Евгеньевич

**ТЕКСТУРА И УПРУГАЯ АНИЗОТРОПИЯ
ОЛИВИНОСОДЕРЖАЩИХ МАНТИЙНЫХ ПОРОД
ПРИ ВЫСОКИХ ВСЕСТОРОННИХ ДАВЛЕНИЯХ**

Специальность: 01.04.07 — физика
конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2002

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка
Объединенного института ядерных исследований, Дубна,
и в Геофизическом институте Чешской академии наук, Прага.

Научный руководитель

доктор физико-математических наук,
профессор Никитин А.Н.

Официальные оппоненты

доктор технических наук,
профессор Жигунов В.В.

доктор физико-математических наук,
профессор Яковлев В.Б.

Ведущая организация

Институт физики Земли
им. Г. А. Гамбурцева РАН

Защита состоится “ ___ ” _____ 2002 года в _____ час. на
заседании диссертационного совета Д.720.001.06 при Лаборатории ней-
тронной физики и Лаборатории ядерных реакций Объединенного ин-
ститута ядерных исследований (141980, Дубна, Московская область,
ОИЯИ).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан “ ___ ” _____ 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Попеко А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. С использованием рассеяния нейтронов изучается широкий спектр проблем, связанных со свойствами твердых тел, жидкостей и т. д. на макро- и микроскопическом уровне [1]. За последнее десятилетие благодаря использованию мощных источников нейтронов произошло интенсивное внедрение методов нейтронографии в практику решения задач в науках о Земле: при исследовании структуры и текстуры горных пород в широком интервале температур и давлений [2-4]. На современном этапе значительного прогресса в решении этих задач можно достичь при комплексном применении новейших экспериментальных методов (например, нейтронографического текстурного анализа, совместно с акустическими измерениями) и теории (например, моделирование анизотропии упругих свойств на основе функции распределения ориентаций (ФРО), восстановленной из дифракционных данных).

Среди зарубежных специалистов в области текстурного анализа лидерами являются Х. -Г. Бунге, Г. -Р. Венк, Г. -Г. Брукмайер, К. Вебер, М. Дамс, У. Ф. Кокс, Г. Листер, К. Уллемайер, Д. Майнпрайс, К. Вальтер, В. Скротцки, З. Маттиз, З. Сигизмунд, К. Хельминг и др, в России это Т. И. Савелова, Т. И. Бухарова, А. Н. Никитин, Д. И. Николаев, Т. И. Иванкина, Г. А. Соболев, В. Б. Яковлев, С. Ф. Куртасов и др.

Для понимания многих геологических и геофизических явлений необходима информация о составе и свойствах вещества глубинных горизонтов земной коры и мантии. С этими характеристиками связаны основные процессы, протекающие на больших глубинах [5-8]. Для правильной интерпретации результатов глубинных геофизических наблюдений, кроме термодинамических условий и состава, необходимо знать и физические свойства вещества литосферы.

В настоящее время известно, что и океаническая, и континентальная литосфера Земли характеризуются анизотропией скоростей распространения сейсмических волн. Понимание ее природы, выявление основных факторов и закономерностей дает возможность более полно и точно интерпретировать результаты глубинных геофизических наблюдений, а также вводить поправки на глобальные и региональные несоответствия расчетных (полученных теоретически на основе существующих моделей земной коры и мантии) и наблюдаемых скоростей сейсмических волн [9]. Более того, исследования сейсмической анизотропии позволяют получать новую информацию и для решения других задач в науках о Земле. Например, при изучении разномасштабных мантийных течений и динамики движения литосферных плит, для решения проблемы реконструкции палеотектонического напряженно-деформированного состояния блоков земной коры и мантии и др.

Изучению анизотропии горных пород уделяется большое внимание. Благодаря работам как отечественных (К. С. Александров, Е. И. Баюк, М. П. Воларович, А. Ф. Грачев, Л. Ф. Добржинская, Б. П. Беликов, Э. И. Пархоменко, О. И. Силаева, Ф. М. Левитова, Г. А. Ефимова, С. М. Киреевкова, А. Н. Никитин, Е. М. Чесноков и др), так и зарубежных (В. Бабушка, Г. Ф. Ванг, Г. -Р. Венк, Дж. Канова, С. -И. Карато, Г. Керн, К. Клима, М. Кумазава, Д. Майнпрайс, З. Прос,

В. Скротцки, Г. Г. Хесс, Н. И. Христенсен и др.) специалистов получены основные результаты в данном разделе наук о Земле.

Однако следует заметить, что длительное время данные об анизотропии упругих свойств горных пород накапливались применением лабораторных ультразвуковых методов и методов полевой сейсмологии. Наиболее информативными для изучения сейсмической анизотропии мантии являются методы глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) и изучение различных свойств образцов горных пород, вынесенных на поверхность при тектонической, магматической и вулканической деятельности. Одним из основных источников данных о вещественном составе, состоянии и свойствах глубинных зон литосферы Земли являются оливиновые ксенолиты из щелочных базальтовых лав, широко развитых в областях новейшего вулканизма в пределах континентальных рифтов и областей предрифтового развития. Поскольку возраст лав, вмещающих ксенолиты, в геологическом масштабе сравнительно молодой, то сами ксенолиты могут давать уникальную информацию о составе, структуре и свойствах вещества верхней мантии Земли.

Цель диссертационной работы – комплексное (с помощью дифракции нейтронов и импульсного ультразвукового прозвучивания при высоких всесторонних давлениях) изучение связи кристаллографической текстуры и текстуры формы с анизотропией упругих свойств оливиносодержащих мантийных горных пород, вынесенных с разных глубин литосферы.

В соответствии с целью в работе были поставлены следующие задачи:

- Методом импульсного ультразвукового прозвучивания в интервале всесторонних давлений от атмосферного до 400 МПа изучить параметры анизотропии упругих свойств образцов оливиносодержащих мантийных горных пород, отличающихся местом происхождения и способом выхода на поверхность.
- Методом нейтронографического текстурного анализа изучить особенности текстурного строения этих оливинитов. Установить связь между анизотропией упругих свойств образцов при всесторонних давлениях от атмосферного до 400 МПа и кристаллографическими текстурами оливина.
- На основе ФРО, восстановленных из нейтронно-дифракционных данных, провести моделирование анизотропии скоростей продольных упругих волн в исследуемых оливинитах и сопоставить с экспериментальными данными, полученными при различных давлениях.
- На основе полученных экспериментальных результатов обосновать геофизические приложения нейтронографического текстурного анализа.

Научная новизна исследований, составляющих основное содержание диссертации, состоит в следующем.

Впервые применен комплекс физических методов (нейтронографический текстурный анализ и импульсное ультразвуковое прозвучивание при высоких всесторонних давлениях), позволяющий на разных масштабных уровнях проводить изучение текстуры и упругой анизотропии горных пород.

Показано, что комплексное применение методов позволяет оценить вклад основных, контролирующих упругую анизотропию на разных глубинах литосферы факторов: текстуры формы (т.е. упорядоченных пор и микротрещин) и кристаллографической текстуры (т.е. преимущественной ориентировки кристаллических решеток слагающих породу минералов).

Предложена качественная модель текстурного строения оливинитов, объясняющая поведение их упругой анизотропии с ростом величины всестороннего давления.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Впервые применено комплексное исследование (нейтронографический текстурный анализ и импульсное ультразвуковое прозвучивание при высоких всесторонних давлениях) для получения прямой информации о влиянии кристаллографической текстуры и текстуры формы на анизотропию упругих свойств горных пород при различных гидростатических давлениях.
2. Установлено, что упругая анизотропия оливиносодержащих мантийных пород при высоких всесторонних давлениях (>200-400 МПа) обусловлена, в основном, кристаллографической текстурой оливина.
3. Установлено, что влияние текстуры формы с ростом величины всестороннего давления (до 100-200 МПа) может приводить как к усилению, так и ослаблению (иногда, сменяющимися друг друга) упругой анизотропии породы, и определяется взаимной ориентацией дефектов (микротрещин и пор) и зерен в текстурированном образце.
4. Качественная модель оливинового поликристалла с различным взаимодействием текстуры формы и кристаллографической текстуры, объясняющая поведение их упругой анизотропии с ростом величины всестороннего давления.
5. Продемонстрирована возможность применения данных о кристаллографических текстурах горных пород для решения некоторых фундаментальных задач геофизики, таких как: определение термодинамических условий и механизма текстурообразования в оливинитах и реконструкция палеотектонического напряженного состояния в блоках литосферы.

Научная и практическая значимость

Предложенный в работе комплексный метод позволяет проводить изучение упругой анизотропии мантийных горных пород на разных масштабных уровнях и не требует при этом даже частичного разрушения исследуемого материала.

Выявлена принципиальная возможность только по результатам нейтронографического текстурного анализа построить карты изолиний скоростей упругих волн, характеризующие упругую анизотропию оливиносодержащих горных пород при высоких всесторонних давлениях.

Продемонстрированы экспериментальные возможности нейтронографического текстурного анализа для реконструкции напряженно-деформированного состояния блоков литосферы Земли.

Апробация диссертации Основные результаты исследования докладывались: на второй и третьей научных конференциях молодых ученых и специалистов (Дубна, 1998 и 1999), “Second International Seminar on Neutron Scattering at High Pressure” (Дубна, 1999), “Second European Conference on Neutron Scattering” (Budapest, Hungary, 1999), “XVII General Assembly of the European Seismological Commission” (Lisbon, Portugal, 2000), “XXVI General Assembly of the European Geophysical Society” (Nice, France, 2001), на совещаниях «Реактор ИБР-2 в XXI веке» (Дубна, 2001 и 2002).

Публикации

Основные результаты исследований опубликованы в 5 работах, которые приведены в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Работа содержит 143 страницы текста, включая 12 таблиц, 80 рисунков и список литературы из 198 наименований.

Автор благодарит сотрудников Геофизического института Чешской Академии Наук З. Проса, Т. Локаичека и К. Климу, совместно с которыми были получены экспериментальные данные об анизотропии упругих свойств оливинитов. Автор выражает глубокую признательность начальнику группы текстурного анализа ЛНФ ОИЯИ К. Уллемайеру за помощь при проведении нейтронных экспериментов. Кроме этого автор благодарен профессору ТГПУ им. Л. Н. Толстого, д.ф.-м.н. В. А. Панину за помощь и проявленное внимание в течение всего времени работы над диссертацией.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследования. Показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, даны сведения об объеме и структуре диссертации, публикациях, апробации основных результатов диссертации на конференциях.

В первой главе приводится обзор опубликованных данных по изучению анизотропии упругих свойств горных пород в связи с задачами в науках о Земле. **В параграфах 1.1 - 1.3** рассмотрены основные, определяющие упругие свойства и анизотропию горных пород факторы: минеральный состав, высокое давление и температура, текстура формы и кристаллографическая текстура.

В параграфе 1.4 приводятся данные о структуре и свойствах оливина, как основного породообразующего минерала. Показано, что оливин является представителем ортосиликатов и характеризуется ромбической симметрией с пространственной группой $Pbnm$. Структура решетки оливина может быть рассмотрена как серия изолированных кремнекислородных тетраэдров, соединенных между собой металлическими катионами, обладающими октаэдрической координацией. В природе встречаются две основные модификации оливина: Mg_2SiO_4 – *форстерит* и Fe_2SiO_4 – *фаялит*. Особенности внутреннего строения кристалла

оливина с одной стороны порождают хорошо выраженную анизотропию упругих свойств этого минерала ($k \approx 25\%$), с другой – его высокую пластичность.

Приведен обзор экспериментальных данных по изучению пластических деформаций в оливиновых моно- и поликристаллах, в результате которых было установлено, что смена систем скольжения в оливине является функцией температуры и слабо зависит от скорости деформации и приложенного давления. Показаны основные типы кристаллографических текстур, возникающих в пластически деформированном оливине, а также условия их формирования.

Далее проведен анализ литературных данных по исследованию упругой анизотропии и текстуры природных оливиноносодержащих пород. Рассмотрены применявшиеся в этих работах экспериментальные методы. Показаны их основные недостатки.

На основании проведенного анализа сформулированы цель и основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена экспериментальному изучению анизотропии упругих свойств мантийных оливинитов. Эти работы проводились в Геофизическом институте Чешской Академии наук в Праге. В **параграфе 2.1** приведено описание используемого в данной работе метода ультразвукового изучения упругой анизотропии при всесторонних давлениях на шаровых образцах. Рассмотрены устройство, принцип действия установки и вопросы, связанные с точностью получаемых результатов.

Образцы для ультразвуковых измерений изготавливались из вынесенных на поверхность земли ксенолитов и дунитов. В процессе обработки маркировка, определяющая естественную систему координат породы, переносилась на шар, диаметр которого после шлифовки был равен 5 см. Для предотвращения проникновения по порам и трещинам передающей давление жидкости, образец покрывался слоем эпоксидной смолы.

Исследование упругой анизотропии оливиновых образцов проводилось путем анализа скоростей распространения продольных упругих волн (P -волн). Скорость P -волн определялась по формуле:

$$V_p = \frac{D}{t - (\Delta t_a + \Delta t_b)} \quad (1)$$

где D – диаметр образца; t – время прохождения ультразвукового импульса, зарегистрированное аппаратурой; Δt_a – время задержки импульса в измерительной аппаратуре и пьезоэлектрических преобразователях; Δt_b – время задержки в защитном слое образца (вычисляется по данным измерения толщины слоя покрытия и скорости P -волн в нем). В ходе эксперимента при фиксированном значении давления получается совокупность данных о скоростях, измеренных в 132 независимых направлениях. На основе этих данных строятся карты изолиний скоростей.

В **параграфе 2.2** приведены результаты изучения упругой анизотропии оливинитов. Согласно цели и поставленным в работе задачам для изучения была использована коллекция образцов природных оливиновых ксенолитов и дунитов, отобранная в различных регионах Европы. Дунит $BQ4$ из массива Kukes Албанской Мирдитовой зоны, дуниты 9721 и 9722 отобраны в Иврийской зоне (Балмучийский перидотитовый массив, Северная Италия), $ZB1$ и $SEM1$ – перидотитовые

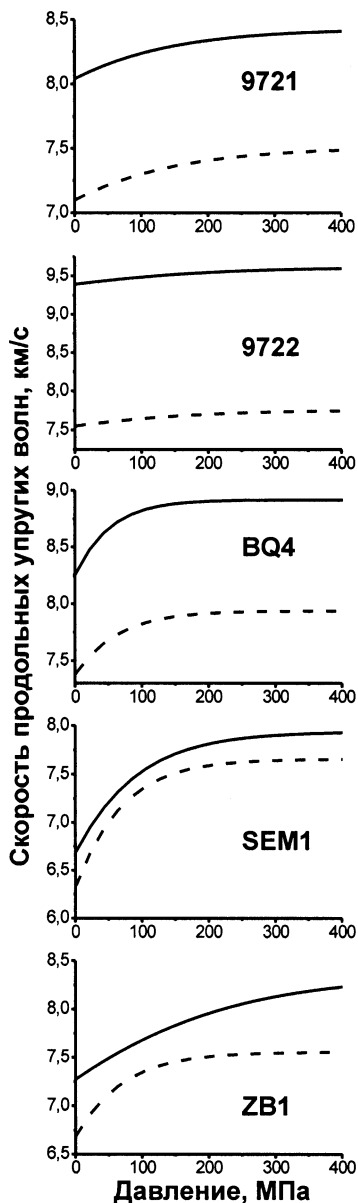


Рис. 1 Изменение скоростей продольных упругих волн с ростом давления

ксенолиты из базальтовых лав Богемского массива (Чехия), *OLIV1* и *OLIV2* получены с Канарских островов, а *NA5N* - из Норвегии.

Измерения скоростей продольных упругих волн проводились циклически: сначала при атмосферном давлении, затем при давлениях 10, 20, 50, 100, 200 и 400 МПа. При атмосферном давлении все образцы обнаруживали большой разброс значений как минимальных, так и максимальных скоростей упругих волн.

С ростом величины всестороннего давления наблюдалось непрерывное увеличение скоростей (рисунок 1), причем у образцов *BQ4*, *ZB1* и *SEM1* наиболее интенсивный рост как V_{Pmin} (пунктирная линия), так и V_{Pmax} (сплошная линия) имел место на начальном этапе увеличения давлений (от 0.1 до 100 МПа). Повышение всестороннего давления от 100 до 400 МПа сопровождалось уже довольно малым увеличением скоростей в образцах дунитов (0.1-0.2 км/с) по сравнению с ксенолитами (0.3-0.5 км/с).

Для анализа пространственного распределения скоростей по данным акустических измерений были построены карты изолиний скоростей *P*-волн при различных давлениях. Было установлено, что конфигурация изолиний скоростей с ростом давления меняется, положения максимумов и минимумов скоростей смещаются, но после $p = 100$ МПа карты становятся более стабильными и сглаженными. Распределения скоростей, полученные при давлении 400 МПа, проявляют характерный рисунок максимумов и минимумов, расположенных под углом 90° и отражают орторомбическую симметрию оливиносодержащих пород (рисунок 3а).

Вычисление коэффициентов анизотропии скоростей упругих волн k проводилось по формуле:

$$k = \frac{V_{Pmax} - V_{Pmin}}{V_{Pmin}} \times 100\% \quad (2)$$

Как показали расчеты, при атмосферном давлении все исследованные образцы характеризуются ярко выраженной анизотропией ско-

ростей упругих волн. Повышение всестороннего давления обнаружило сильные различия в поведении анизотропии ксенолитов и дунитов (рисунок 2).

С ростом давления упругая анизотропия дунитов 9721 и 9722 меняется очень слабо. На всем интервале давлений происходит ее слабое монотонное уменьшение, составляющее 1-2 %. В дуните BQ4 на начальном этапе происходит незначительный (~2 %) рост k , который прекращается уже при давлении порядка 60 МПа. Начиная с 80 МПа величина k убывает аналогично образцам 9721 и 9722.

В случае с ксенолитами SEM1 и ZB1 картина совершенно иная. В диапазоне от 0.1 до 60-80 МПа происходит явное уменьшение коэффициентов анизотропии на 4-6 %. При давлениях 100 МПа и выше, в отличие от образцов дунитов, наоборот, возникает рост k , причем у образца ZB1 он происходит более интенсивно.

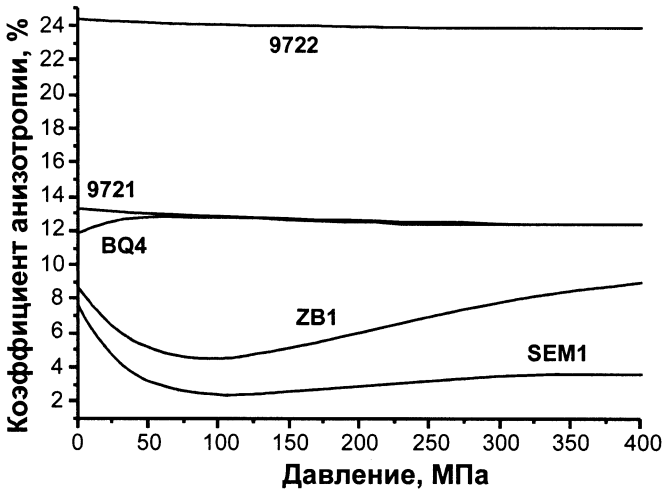


Рис. 2 Зависимости коэффициентов упругой анизотропии образцов от величины всестороннего давления

Было также установлено, что оливиновые образцы, отобранные в пределах одной геологической зоны, проявляют большое сходство в поведении анизотропии с ростом давления, о чем свидетельствуют экспериментальные зависимости коэффициентов k от давления для дунитов 9721 и 9722 (Балмучийский перидотитовый массив) и ксенолитов ZB1 и SEM1 (Богемский массив).

Третья глава посвящена изучению кристаллографических текстур мантийных оливинитов с помощью рассеянных нейтронов и связи ее с упругой анизотропией. В параграфе 3.1 кратко излагаются основы количественного текстурного анализа. Даются определения ориентации, функции распределения ориентаций (ФРО), полюсной фигуры (ПФ), приводятся соотношения между ними, рассматриваются методы восстановления ФРО по экспериментальным ПФ.

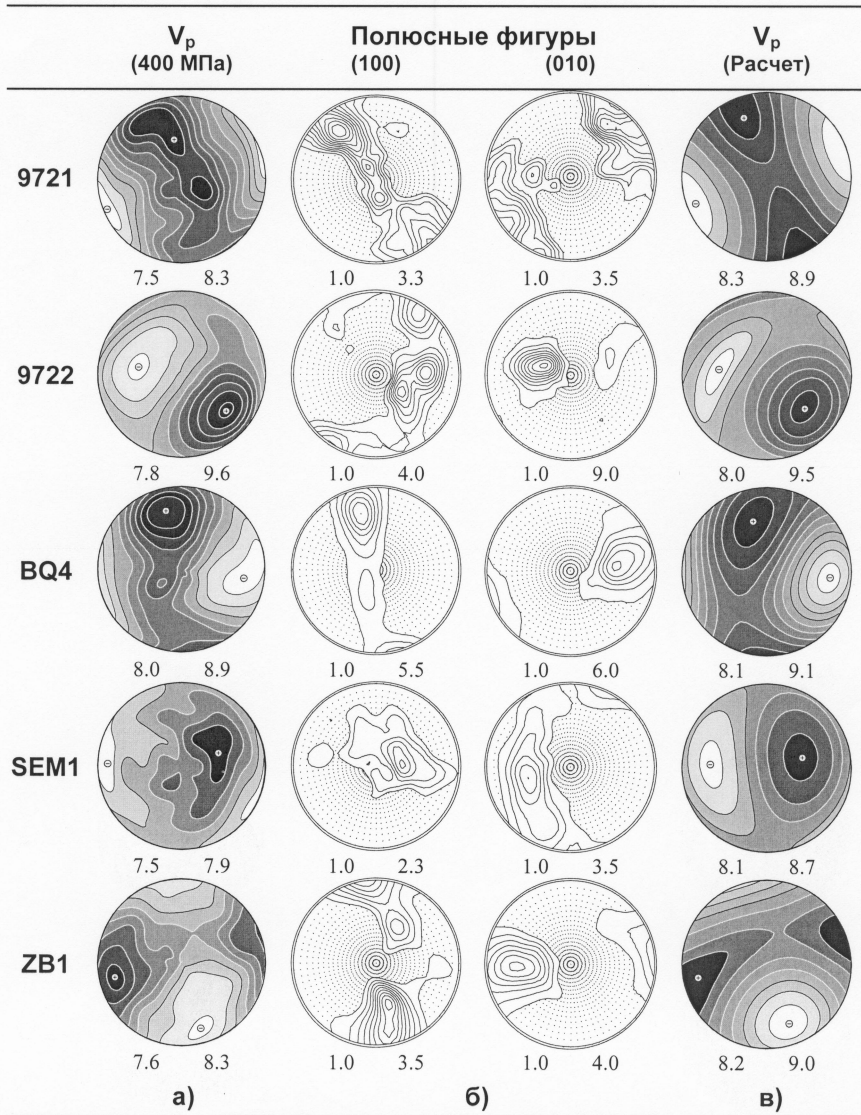


Рис. 3 а) карты изолиний скоростей продольных упругих волн, полученные при 400 МПа; б) полюсные фигуры для главных кристаллографических плоскостей оливина, рассчитанные на основе ФРО; в) карты изолиний скоростей продольных упругих волн, полученные в результате моделирования

В параграфе 3.2 рассматриваются основные методические вопросы, связанные с нейтронно-дифракционным изучением текстур горных пород. Спецификой исследований с помощью нейтронов является необходимость иметь мощные источники нейтронов. В данной работе таким источником был импульсный высокопоточный реактор ИБР-2 (ОИЯИ, Дубна), основные характеристики которого приведены в первом подразделе этого параграфа. Измерения полюсных фигур проводились с помощью экспериментально-исследовательских установок НСВР (Нейтронный спектрометр высокого разрешения) и СКАТ (Спектрометр для количественного анализа текстур). **В подразделах 3.2.3 – 3.2.5** приведено описание этих установок, методики проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных. Показано, что по сравнению с аналогичными приборами, функционирующими в различных исследовательских центрах мира, для экспериментального изучения текстур горных пород спектрометр СКАТ имеет ряд преимуществ.

Таблица. Экспериментальные и рассчитанные с помощью ФРО значения скоростей продольных упругих волн и их анизотропия

Образец	Условия	$V_{p \max}$, км/с	$V_{p \min}$, км/с	k, %
9721	0.1 МПа	8.0	7.0	14
	100 МПа	8.2	7.3	12
	400 МПа	8.3	7.5	11
	Расчет	8.9	8.3	7
9722	0.1 МПа	9.4	7.6	24
	100 МПа	9.4	7.8	21
	400 МПа	9.6	7.8	23
	Расчет	9.5	8.0	19
BQ4	0.1 МПа	8.2	6.9	19
	100 МПа	8.8	7.9	11
	400 МПа	8.9	8.0	11
	Расчет	9.1	8.1	12
SEM1	0.1 МПа	6.5	6.0	8
	100 МПа	7.4	7.1	4
	400 МПа	7.9	7.5	5
	Расчет	8.8	8.3	6
ZB1	0.1 МПа	5.8	4.7	23
	100 МПа	7.8	7.3	7
	400 МПа	8.3	7.6	9
	Расчет	9.0	8.2	10

В параграфе 3.3 приведены результаты изучения текстурного строения мантийных оливинитов. По дифракционным спектрам, зарегистрированным в ходе экспериментов, были построены экспериментальные ПФ (021), (101), (111), (130), (131), (112), (122) и (140) оливина. На их основе для каждого образца вос-

становлены ФРО. Сопоставление экспериментальных и рассчитанных с помощью ФРО полюсных фигур показало хорошее согласие, что свидетельствует о качестве восстановления ФРО.

На основе ФРО были рассчитаны полюсные фигуры для главных кристаллографических плоскостей оливина (100) и (010) (рисунок 36), “невидимых” в нейтронно-дифракционном эксперименте. Эти плоскости связаны с экстремальными направлениями скоростей упругих волн в кристалле оливина. Было отмечено, что конфигурации линий на полюсных фигурах исследованных образцов, изображенных в системе координат упругого тензора (определена в ходе ультразвуковых экспериментов), сопоставимы с экспериментальными картами изолиний скоростей продольных упругих волн, измеренных при давлении 400 МПа. Положения максимумов и минимумов скоростей на картах согласуется с максимумами интенсивности полюсной плотности на соответствующих полюсных фигурах.

Для более точного сравнения было проведено моделирование скоростей P -волн, т.е. их расчет на основе ФРО, восстановленных из дифракционных спектров. Моделирование на первом этапе потребовало вычисления компонент тензора упругих постоянных поликристаллических образцов (по схеме Фойгта-Ройсса) на основе восстановленных ФРО и монокристалльных упругих модулей оливина. Поскольку содержание оливина в образцах составляет 95-97 %, влияние других минеральных фаз в расчет не принималось.

Результатом моделирования являются представленные на рисунке 3в карты пространственного распределения скоростей P -волн, также приведенные к системе координат ультразвуковых измерений. Модельные распределения V_p показывают сходство с экспериментальными картами, полученными при давлении 400 МПа. Значения коэффициентов анизотропии оливиновых образцов, рассчитанные по результатам дифракционных экспериментов, практически всегда (за исключением образца 9722) оказываются выше значений, измеренных экспериментально (таблица). Это обусловлено тем, что при расчетах величин V_p учитывался только один фактор – кристаллографическая текстура оливина. Влияние “неоливиновой” минеральной фазы, объемной пористости, зернограничного пространства и др. в расчет не принималось.

Четвертая глава посвящена обсуждению и интерпретации результатов.

Изучение упругой анизотропии образцов горных пород в условиях высоких всесторонних давлений обычно проводится посредством определения скоростей акустических волн в некоторых, определяемых формой образцов, направлениях. Для кубических образцов таких направлений три, в случае многогранников (куб с усеченными вершинами) – порядка 7. В данной работе измерение скоростей проводилось в 132 независимых направлениях (с равномерным угловым шагом 15°), что позволило с высокой точностью установить ориентировки главных компонент упругих тензоров оливиновых образцов и определить величины максимальных и минимальных скоростей продольных упругих волн. Кроме того, воздействие высокого гидростатического давления в диапазоне от 0.1 до 400 МПа позволило подробно изучить влияние текстуры формы на упругую анизотропию оливинитов.

Изучение кристаллографических текстур долгое время проводилось путем измерения ориентировок оптических осей десятков - сотен оливиновых зерен, тогда как образец природного ксенолита с поперечными размерами порядка нескольких сантиметров может содержать несколько тысяч таких зерен. В настоящее время наиболее информативными для изучения текстур поликристаллических материалов являются дифракционные методы: электронографический, рентгенографический и нейтронографический. Все они основаны на явлении дифракции соответствующего типа излучения на периодической структуре кристаллов и различаются по глубине проникновения внутрь вещества. Первые два метода вследствие малой глубины проникновения (десятки - сотни микрон) применяются для изучения, в основном, поверхностных слоев и тонких пленок мелкозернистых материалов. Глубина же проникновения нейтронов в вещество характеризуется несколькими сантиметрами, поэтому позволяет проводить изучение текстур больших (порядка 5-7 см) крупнозернистых образцов горных пород, с учетом ориентировок большого количества зерен. Эти особенности позволяют успешно решать проблемы статистической представительности результатов и обеспечить возможность получения количественной информации о текстуре исследуемого геоматериала – ФРО. Кроме того, применение нейтронной дифракции при изучении горных пород не требует их даже частичного разрушения, что позволяет сохранить экспериментальные образцы и использовать их для дальнейшего изучения. Поэтому нейтронографический текстурный анализ, на сегодняшний день, является оптимальным методом, позволяющим получать наиболее полную и точную качественную и количественную информацию о кристаллографических текстурах горных пород.

Комплексное применение использованных в данной работе методов позволило исследовать упругую анизотропию одних и тех же образцов горных пород на макро- и микроскопическом уровне. Было изучено влияние, как текстуры формы, так и кристаллографической текстуры на упругую анизотропию оливинитов в широком диапазоне всесторонних давлений.

Наблюдаемое согласие экспериментальных карт изолиний, полученных при 400 МПа, с модельными, построенными на основе данных дифракционного эксперимента, является доказательством того, что кристаллографическая текстура оливина является основным фактором, контролирующим упругую анизотропию оливиносодержащих горных пород при высоких всесторонних давлениях.

Степень дезинтеграции породы определяется температурными градиентами, возникающими в ее объеме при охлаждении, т. е. находится в прямой зависимости от скорости ее выхода на поверхность. Так, длительные, протекающие в течение миллионов лет, экструзивные процессы (как в случае дунитов 9721, 9722 и BQ4), характеризуются незначительным дефектообразованием в структуре горной породы. Если же вынос породы происходил быстро (например, в ходе вулканической деятельности, как в случае образцов SEM1 и ZB1), то, в силу резкого снижения величины давления и больших температурных перепадов при охлаждении, в породе неизбежно происходит масштабное дефектообразование. В таких случаях упругая анизотропия породы и ее характер при различных давлениях будут определяться не только кристаллографической текстурой, но и текстурой формы. При этом возможны следующие основные варианты:

- I. Плоскости трещин преимущественно ориентируются параллельно плоскостям (100) текстурированного оливинита.
- II. Плоскости трещин преимущественно ориентируются перпендикулярно плоскостям (100) текстурированного оливинита.
- III. Нет ярко выраженной преимущественной ориентировки трещин (хаотическое распределение).

В первом случае ориентированные плоские дефекты в большинстве своем располагаются перпендикулярно кристаллографическому направлению [100]. Такая взаимная ориентация зерен и трещин приводит к довольно низким (по сравнению с V_{Pmin}) значениям V_{Pmax} для оливинитов при атмосферном давлении. С ростом величины всестороннего давления наряду с уплотнением горной породы происходит постепенное закрытие трещин, которое, как показывает эксперимент, наиболее интенсивно происходит в диапазоне от 0.1 до 100-200 МПа. Поэтому, при увеличении всестороннего давления, в указанном диапазоне наблюдается более интенсивный (по сравнению с V_{Pmin}) рост значений V_{Pmax} , что приводит к характерной зависимости коэффициента анизотропии k от величины всестороннего давления и экспериментально наблюдается на примере образца дунита *BQ4* (рисунки 1 и 2).

Во втором случае плоскости ориентированных трещин располагаются преимущественно параллельно кристаллографическому направлению [100] текстурированного оливинита. Такая конфигурация системы зерен и трещин приводит к заниженным при атмосферном давлении значениям V_{Pmin} , которые, при повышении давления растут более интенсивно по сравнению с V_{Pmax} , что и отражается в изменении (по сравнению со случаем I) характера кривой $k(p)$. Эта картина экспериментально наблюдается на примере образцов ксенолитов *SEM1* и *ZB1* (рисунки 1 и 2).

Случай с хаотическим распределением плоских дефектов характеризуется в равной степени низкими значениями как V_{Pmax} , так и V_{Pmin} в диапазоне от 0.1 до 100-200 МПа. Рост кривых зависимостей экстремальных значений скоростей от величины всестороннего давления происходит практически с одинаковой, определяемой степенью дезинтеграции породы интенсивностью, и не приводит к каким-либо значительным изменениям коэффициента k с ростом давления. Экспериментальные данные для образцов *9721* и *9722*, приведенные на рисунках 1 и 2, отражают эту ситуацию.

Таким образом, возникающие в объеме породы ориентированные трещины и щелевидные поры могут приводить как к увеличению, так и уменьшению упругой анизотропии при давлениях порядка 0.1-200 МПа. Наряду с текстурой формы, характер анизотропии горной породы в значительной степени определяют и беспорядочно ориентированные дефекты. С ростом всестороннего давления влияние этой составляющей, также как и текстуры формы, существенно уменьшается, но не устраняется совсем, о чем свидетельствуют результаты сравнения скоростей и коэффициентов k , полученных для исследованных образцов по экспериментальным данным и в ходе моделирования на основе ФРО (таблица).

К настоящему времени в разных лабораториях мира накоплено большое количество экспериментальных данных об условиях и механизмах пластической деформации оливина, происходящей при различных термодинамических пара-

метрах. Обобщением этих данных являются представленные на рисунке 4 идеальные деформационные текстуры оливиновых поликристаллов, а также температурные условия их образования и активные системы скольжения.

Температурный интервал I (600-900 °C) характеризуется скольжением набором плоскостей (100) и {110} в направлении [001]. В интервале II (900-1300 °C) активным становится карандашевидное скольжение плоскостей (0kl) в направлении [100]. При более высоких температурах (1300 до 1600 °C), соответствующих интервалу III, доминирующей оказывается система (010) в направлении [100]. Причем в самом начале этого диапазона (при температуре порядка 1300 °C) действует еще и система {101} [010], что проявляется в возникновении дополнительных максимумов на полюсных фигурах (100) и (001).

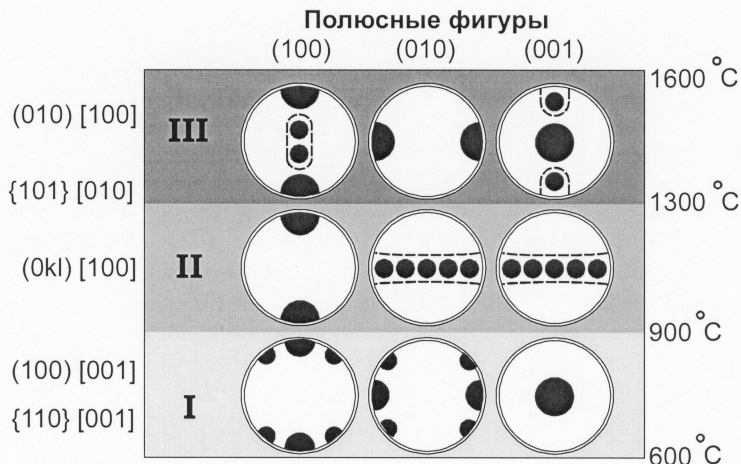


Рис. 4 Идеальные деформационные текстуры оливина, механизмы и условия текстурообразования

Сравнительный анализ этих идеальных (рисунок 4) и экспериментально определенных в нашем дифракционном эксперименте (рисунок 5) текстур позволил провести оценку температурных условий текстурообразования в изучаемых нами оливинитах.

Полюсные фигуры первых шести образцов (9721, 9722, BQ4, SEM1, ZB1 и NA5N) хорошо согласуются с идеальными текстурами, возникающими в ходе высокотемпературной (1300-1600 °C) пластической деформации. На экспериментальных полюсных фигурах (100) прослеживаются как основные, соответствующие системе скольжения (010) [100], так и дополнительные, соответствующие скольжению {101} [010], максимумы полюсной плотности. Схожая картина наблюдается и при рассмотрении полюсных фигур (001) этих образцов. Аксиально-симметричное распределение интенсивностей на полюсных фигурах (010) также демонстрирует соответствие идеальных и экспериментальных текстур.

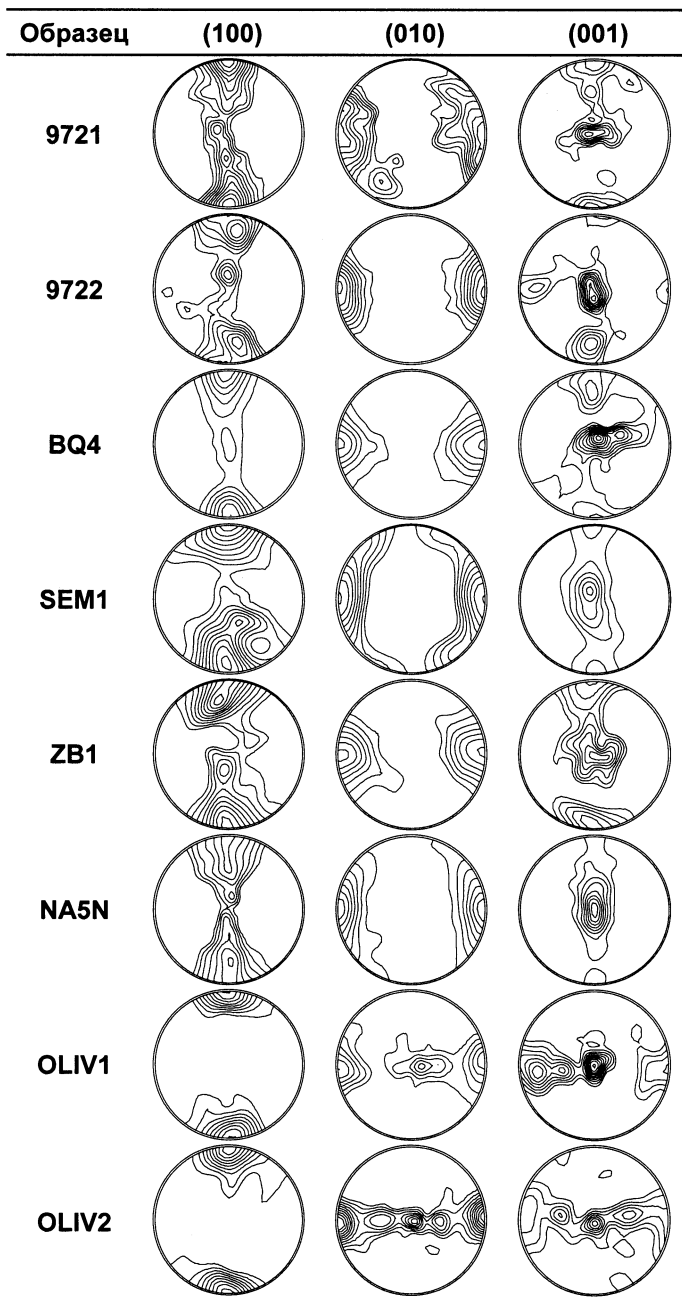


Рис. 5 Полосные фигуры для главных кристаллографических плоскостей исследованных оливинитов

В случае образцов *OLIV1* и *OLIV2* на полюсных фигурах (100) ярко выражены аксиально-симметричные распределения полюсной плотности. Полюсные фигуры (010) и (001) характеризуются поясными распределениями с многочисленными максимумами, рассредоточенными вдоль этих поясов, что хорошо согласуется с идеальными текстурами, образующимися при температуре от 900 до 1300 °С, в ходе пластической деформации по системе скольжения (0kl) [100].

Оливиновые ксенолиты несут в себе информацию о виде протекающей в мантии пластической деформации. Тип кристаллографической текстуры, с одной стороны, обуславливает характер анизотропии упругих свойств горной породы на глубине, а с другой – несет память о том тензоре деформации, который формировал обнаруженную текстуру. Так, например, в работе [10] было показано, что параллельно направлению максимального сжатия ксенолитов стремятся расположиться главные кристаллографические оси [010] деформированных оливинов. Расположение осей [100] обнаруживает общую тенденцию к ориентации параллельно оси наибольшего растяжения ксенолита.

Система координат полюсных фигур, измеренных методом нейтронной дифракции, связана с системой координат упругого тензора (с направлением максимальной и минимальной скоростей упругих волн) образца. Таким образом, направления компонент тензора деформации могут быть определены в системе координат упругого тензора анизотропного образца, как, например, изображено на рисунке 6.

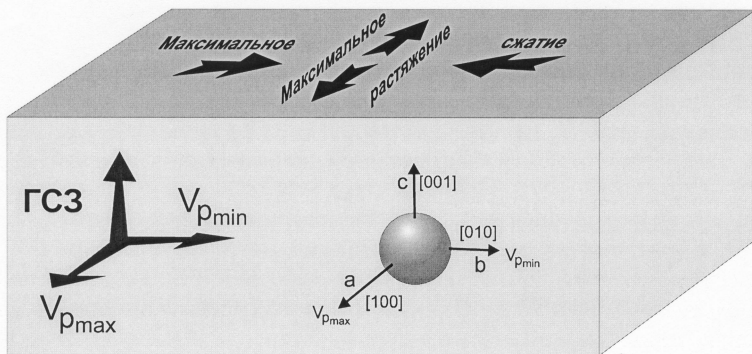


Рис.6 Пример реконструкции напряженно-деформированного состояния блока литосферы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследованы текстура и упругая анизотропия образцов мантийных оливиносодержащих ксенолитов и дунитов, отобранных в различных регионах Европы. Из полученных методами нейтронографического текстурного анализа и импульсного ультразвукового прозвучивания при высоких всесторонних давлениях результатов, как основные обобщения следуют выводы:

1. Установлено, что основным фактором, контролирующим упругую анизотропию оливиносодержащих мантийных пород при высоких всесторонних давлениях ($>200-400$ МПа) является кристаллографическая текстура оливина.
2. Установлено, что влияние текстуры формы с ростом величины всестороннего давления (до $100-200$ МПа) может приводить как к усилению, так и ослаблению (иногда, сменяющимися друг друга) упругой анизотропии породы и определяется взаимной ориентацией дефектов (микротрещин и пор) и зерен в текстурированном образце.
3. Предложена качественная модель оливинового поликристалла с различным взаимодействием текстуры формы и кристаллографической текстуры, объясняющая поведение их упругой анизотропии с ростом величины всестороннего давления.
4. Проведена оценка условий текстурообразования в оливинитах. На основе известных данных о механизмах и условиях пластической деформации оливина и данных, полученных в нейтронно-дифракционном эксперименте, можно предположить, что формирование текстур происходило при пластической деформации по системам скольжения $(0kl)[100]$ (*OLIV1* и *OLIV2*) и $(010)[100]/(101)[010]$ (*9721*, *9722*, *BQ4*, *NA5N*, *ZB1* и *SEM1*) в температурных интервалах $900-1300$ °C и $1300-1600$ °C соответственно.
5. Продемонстрирована возможность применения данных о кристаллографических текстурах горных пород для решения некоторых фундаментальных задач геофизики, таких как: определение термодинамических условий и механизма текстурообразования в оливинитах и реконструкция палеотектонического напряженного состояния в блоках литосферы.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Т.И.Иванкина, А.С.Кирилов, М.Л.Коробченко, А.Н.Никитин, А.Б.Роганов, А.П.Сиротин, А.С.Телепнев, К.Уллемайер, Г.А.Ефимова, С.М.Киреевкова, Г.А.Соболев, В.А.Сухопаров, Д.Е.Буриличев *Экспериментально-измерительный комплекс нейтронографического структурного и текстурного анализа для исследования переходных процессов и физических свойств в геоматериалах при механических и тепловых воздействиях* // Заводская лаборатория. 1999. № 8. С. 26-34.
2. D.E.Burilichev, T.I.Ivankina, K.Klima, T.Locajicek, A.N.Nikitin, Z.Pros *Investigation of rock samples by neutron diffraction and ultrasonic sounding* // Physica B. 2000. Vol. 1. № 2.
3. Д.Е.Буриличев, Т.И.Иванкина, А.Н.Никитин, К.Клима, Т.Локаичек, З.Прос *Исследование оливиносодержащих ксенолитов с помощью дифракции нейтронов и ультразвукового прозвучивания* // Труды IV научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ. Дубна. 2000. С. 78-80.
4. А.Н.Никитин, Т.И.Иванкина, Д.Е.Буриличев, К.Клима, Т.Локаичек, З.Прос *Анизотропия и текстура оливиносодержащих мантийных пород при высоких давлениях* // Физика Земли. 2001. № 1. С. 64-78.

5. Д.Е.Буриличев, А.Н.Никитин, Т.И.Иванкина, К.Клима, Т.Локаичек, З.Прос *Исследование анизотропии и текстуры оливиносодержащих горных пород при различных давлениях* // Тезисы XIV Российского совещания по экспериментальной минералогии. Черноголовка. 2001. С. 254-255.

Цитируемая литература

1. В.Л.Аксенов *Нейтронная физика на пороге XXI века* // ЭЧАЯ. 2000. Т. 31. Вып. 6. С. 1303-1342.
2. Г.А.Соболев, А.Н.Никитин *Нейтроннография в геофизике* // ЭЧАЯ. 2001. Т. 32. Вып. 6. С. 1359-1404.
3. Г.А.Соболев, А.Н.Никитин, Т.И.Савелова, В.Б.Яковлев *Теоретико-экспериментальный подход к исследованию микро- и макросвойств и состояния горных пород (возможное направление развития моделей очага землетрясений)* // Физика Земли. 2001. № 1. С. 6-15.
4. Т.Д.Шермергор, А.Н.Никитин, К.Вальтер, В.Фойтус, Т.И.Иванкина, В.Б.Яковлев *Определение эффективных упругих модулей текстурированных пород-пьезоэлектриков* // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1991. № 12. С. 84-93.
5. В.А.Магницкий *Общая геофизика* // М: Наука. 1995. 315 с.
6. В.В.Белюсов *Земная кора и верхняя мантия материков* // М: Наука. 1966
7. М.П.Волярович, Е.И.Баюк, А.И.Левыкин, И.С.Томашевская *Физико-механические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах* // М: Наука. 1974. 222 с.
8. Б.Г.Лутц *Петрология глубинных зон континентальной коры и верхней мантии* // М: Наука. 1974. 304 с.
9. Ю.С.Генштафт, В.А.Ермаков, А.Я.Салтыковский *Построение региональных физико-химических моделей глубинных процессов и строения земной коры и верхней мантии* // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1978. № 9. С. 91-110.
10. А.Ф.Грачев, Л.Ф.Добржинская *Структурная анизотропия мантийных ксенолитов из неогеновых вулканитов Центральной Европы и ее значение для интерпретации азимутальной сейсмической анизотропии литосферы* // Глубинные ксенолиты и строение литосферы. М: Наука. 1987. С. 178-193.

Получено 9 сентября 2002 г.

Макет Н. А. Киселевой

ЛР № 020579 от 23.06.97.

Подписано в печать 10.09.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,06. Уч.-изд. л. 1,6. Тираж 100 экз. Заказ № 53506.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.