

## Нейтронографические исследования внутренних деформаций, текстуры и свойств горных пород

Т.И.Иванкина<sup>1</sup>, Т. Локаичек<sup>2</sup>, А.Н.Никитин<sup>1</sup>, Д. Сангаа<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Лаборатория нейтронной физики им.И.М.Франка, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>2</sup>Институт геологии Академии наук Чешской Республики, г. Прага, Чехия

<sup>3</sup>Институт Физики и Технологии Академии наук Монголии, г. Улан-Батор, Монголия

\*Э-почта [sangaa@nf.jinr.ru](mailto:sangaa@nf.jinr.ru)

В работе анализируются принципиальные преимущества нейтронных методов, основанных на феноменальных свойствах нейтрона, позволяющие расширить круг решаемых проблем физики твердого тела, геологии и геофизики. В обзоре приведены 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 так же магнитных и тепловых свойств.

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.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Задачи, решаемые методами нейтронографии, во многом аналогичны тем, которые решаются с помощью хорошо развитой и более доступной рентгенографии. 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 кристаллографическую текстуру твердых тел, минералов и минеральных ассоциаций и их изменений под влиянием внешних воздействий. Благодаря высокой проникающей способности нейтронов могут быть исследованы большие по размерам образцы и получена информация о текстуре больших объемов в отличие от текстур локальных поверхностей, измеряемых рентгеновским методом.

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 [1].

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 при решении подобных задач произошло в результате активного использования в разных странах нейтронографического текстурного анализа, применяемого в комплексе с другими физическими и петрофизическими методами [1].

В настоящее время в геофизике сложилось представление о том, что кристаллографическая текстура является одним из основных факторов, контролирующих анизотропию горных пород [2-5]. Причем контрастность анизотропии находится в зависимости от степени упорядоченности кристаллитов, слагающих 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.

## Ц.ДИФРАКТОМЕТРЫ НА ИМПУЛЬСНОМ ИСТОЧНИКЕ НЕЙТРОНОВ ИБР-2 (ДУБНА, РОССИЯ)

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 просто TOF эксперимент).

Текстурный дифрактометр СКАТ [6] действует на пучке реактора ИБР-2 (ОИЯИ, Дубна, Россия). 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 метра. 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.

Главным преимуществом текстурных TOF-дифрактометров, и СКАТа в том числе, состоит в одновременной регистрации различных полюсных фигур в доступное измерительное время. Это особенно важно для текстурных измерений низкосимметричных и многофазных геологических материалов [7,8]. Спектрометр СКАТ построен и введен в эксплуатацию взамен демонтированного дифрактометра HCBP, функционировавшего с 1988 по 1998 года [9].

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

Работа дифрактометра EPSILON была протестирована на цилиндрическом образце мелового песчаника (кварц), который был продавлен через стальную трубу в течение 20 часов после извлечения, что позволило исследовать деформированные и релаксирующие части одного и того же образца [10]. 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 нейтроннодифракционных измерений для получения полного тензора деформации. Модернизированный Epsilon-MDS [11] включает девятно шесть детекторов, расположенных по кольцу, причем угол рассеяния для всех детекторов  $2\theta = 90^\circ$ . Это значит, что на дифракционных картинах от

каждого детектора все брэгговские рефлексy расположены в одинаковом положении, что является преимуществом новой детекторной системы. При этом достигается лучшее спектральное разрешение  $3 \cdot 10^{-3}$ .

### III. КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ТЕКСТУРЫ И УПРУГИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Количественная информация о кристаллографической текстуре в виде функции распределения кристаллитов по ориентациям их кристаллографических осей (ФРО), восстановленных из дифракционных данных, позволяет провести моделирование скоростей упругих волн в поликристаллических текстурированных образцах. Оно предполагает вычисление компонент тензора упругих постоянных поликристаллических образцов известными методами усреднения на основе ФРО и упругих модулей порообразующих минералов и построение карт изолиний, отражающих распределение скоростей  $P$ -волн на сфере.

Результаты моделирования анизотропии упругих свойств можно показать на примере оливиносодержащих ксенолитов [12]. Рассчитанные карты изолиний пространственного распределения скоростей  $P$ -волн в системе координат, соответствующей положению образца в дифракционном эксперименте, показаны на рис.1. Табличные значения компонент тензора упругих постоянных оливина взяты из [13].

Для тех же образцов с помощью ультразвукового метода [14] 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 производились циклически, сначала при атмосферном давлении, затем при давлениях 10, 20, 50, 100, 200, 400 МПа.

В таблице 1 содержатся значения максимальных и минимальных скоростей продольных волн в образцах, а также значения коэффициентов анизотропии, которые рассчитывались по формуле

$$k = (V_{Pmax} - V_{Pmin}) / V_{Pmin} \times 100 \% \quad (1)$$

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

На рисунке 2 представлены карты изолиний скоростей  $P$ -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.

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

Образец	Давление, 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
	0.1	8.2	6.9	19

<b>BQ4</b>	100	8.8	7.9	11
	400	8.9	8.0	11
<b>SEM1</b>	0.1	6.5	6.0	8
	100	7.4	7.1	4
	400	7.9	7.5	5
<b>ZB1</b>	0.1	5.8	4.7	23
	100	7.8	7.3	7
	400	8.3	7.6	9

Образцы дунитов 9721 и 9722 обладают стабильными картинами распределения скоростей  $P$ -волн во всем диапазоне гидростатических давлений.

Для образца BQ4 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.2) 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.1) с экспериментальными, полученными из ультразвукового эксперимента при давлении 400 МПа (рис.2), 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, величин максимальных, минимальных скоростей и рассчитанных коэффициентов упругой анизотропии  $k$  можно объяснить следующей причиной. При моделировании скоростей  $P$ -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.

#### IV. 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 [15,16].

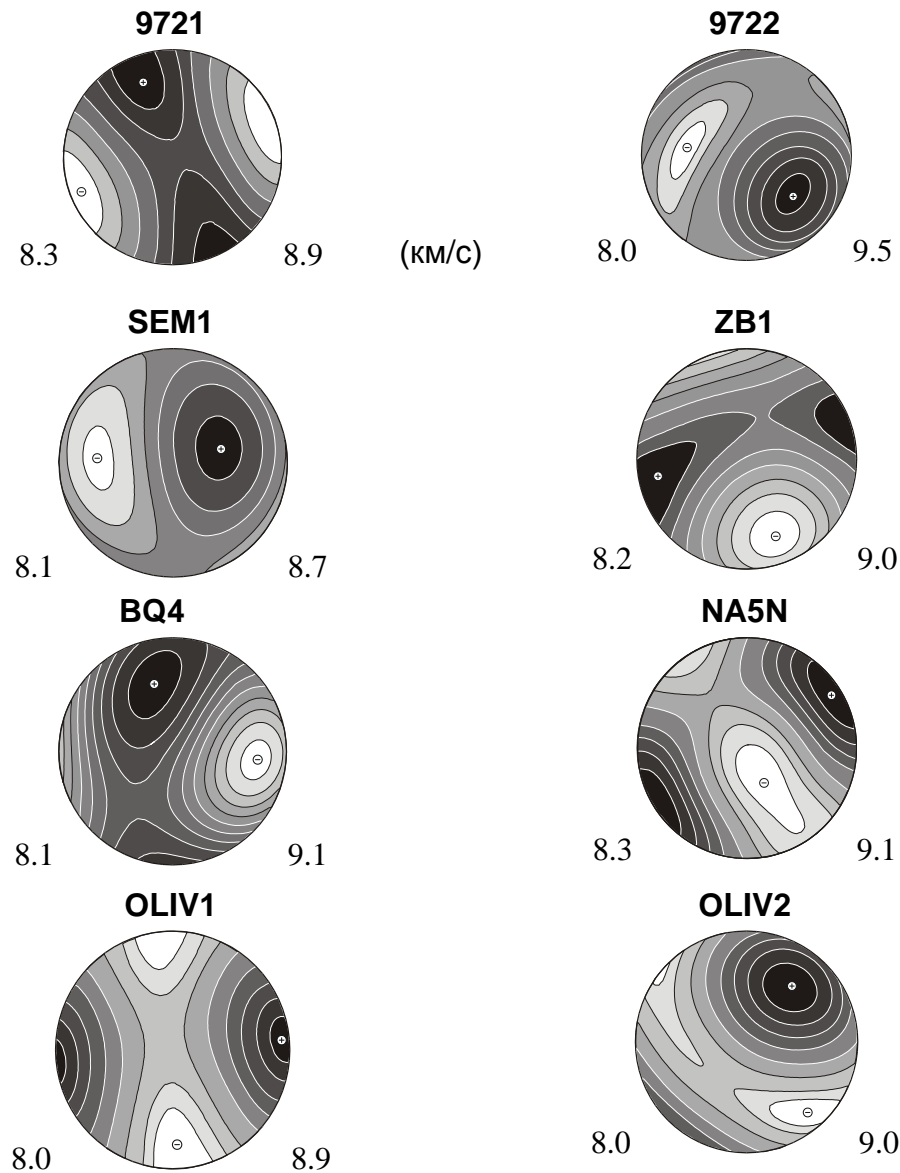
Для понимания физики разрушения таких неоднородных и анизотропных материалов, какими являются горные породы, необходимо тщательно исследовать закономерности появления трещин, начиная с масштабного уровня кристаллических решеток минералов и разрыва межатомных связей в зернограничном материале [17].

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

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



**Рис.1.** Карты изолиний скоростей продольных упругих волн исследованных оливинитов, рассчитанные с помощью ФРО.

механических напряжений, характеризует макроскопическую решёточную деформацию в направлении вектора рассеяния  $Q$  нейтронов, перпендикулярного к плоскости  $(hkl)$ .

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 [18] приводятся первые результаты измерений решеточных деформаций кристаллитов кальцита у образца мрамора, выполненные в ОИЯИ на специальной установке ТКОС (термоуправляемая камера одноосного сжатия) [19]. 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 [20].

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

На рис. 3 представлены зависимости решеточных напряжений  $\sigma_{lattice}$  в образце мрамора от внешней сжимающей нагрузки  $\sigma_{macro}$ , 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 и сжимающем напряжении -32 МПа достигает значения 162.4 МПа, что соизмеримо с пределом прочности мрамора (для разных мраморов предел прочности на сжатие  $\sigma_c$  лежит в интервале 180-300 МПа). В направлении  $(11\bar{2}3)$  напряжение  $\sigma_{lattice}$  с

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

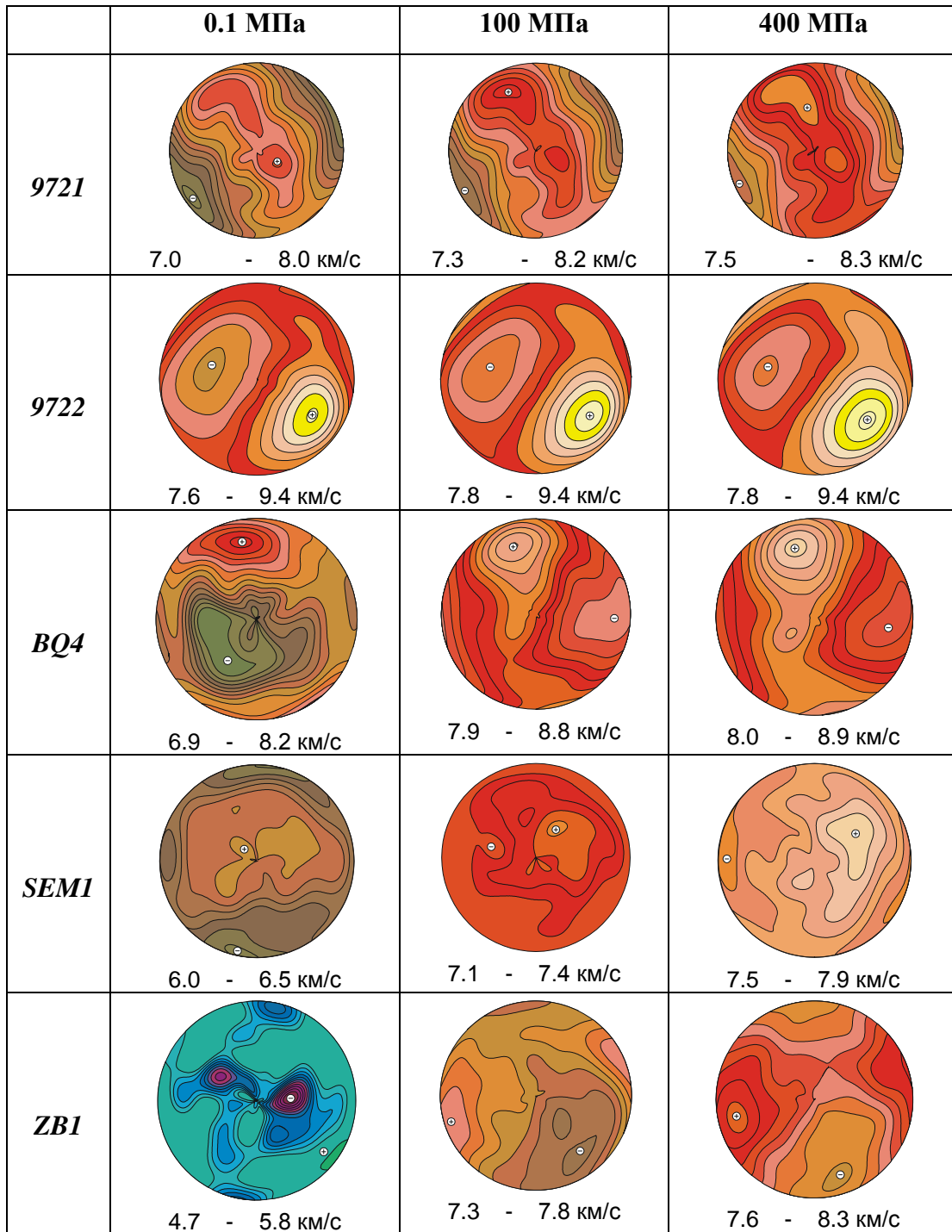
Другая картина наблюдается при одновременном воздействии механической нагрузки и тепла. Для тех же кристаллографических направлений  $(11\bar{2}3)$ ,  $(10\bar{1}4)$ ,  $(21\bar{3}1)$ . решеточные напряжения сильно различаются и существенно превосходят напряжения, приложенные к торцам образца. Это различие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

Решеточное напряжение в направлении  $(10\bar{1}4)$  при температуре 220°C ростом сжимающей нагрузки и температуры меняет знак при 220°C, а в направлении  $(10\bar{1}4)$  это происходит при более низкой температуре 120°C.

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

(hkl)	T, °C	$\Delta d \cdot d^{-1}, *10^3$	E, ГПа	$\sigma_{lattice}$ , МПа	$\sigma_{macro}$ , МПа
$(10\bar{1}1)$	540	0.72	79.0	56.9	-25
	580	1.23	87.5	63.0	-26
			74.0	91.0	
	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	114.0 121.5	18.2 19.4	-27
--	-----	------	----------------	--------------	-----



**Рис.2.** Карты изолиний скоростей продольных упругих волн образцов оливинитов при атмосферном давлении, а также 100 и 400 МПа.

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 [1] 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. Тектурный эффект не играл здесь решающей роли, так как проведенный нейтронографический текстурный анализ образца выявил весьма слабую текстуру.

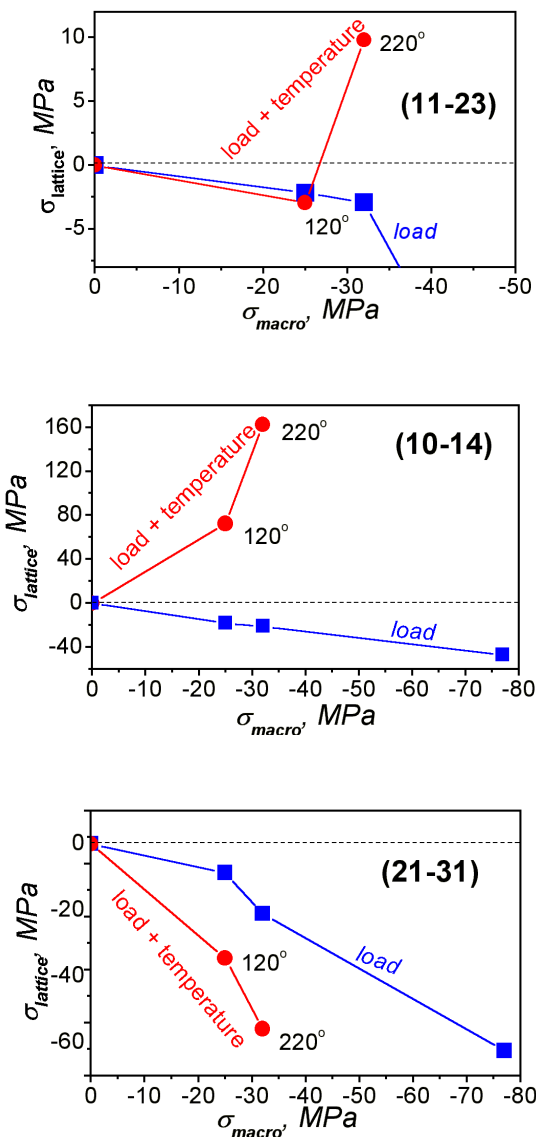


Рис.3. Зависимости решеточных напряжений  $\sigma_{lattice}$  в мраморе от внешней сжимающей нагрузки  $\sigma_{macro}$ : прямоугольниками отмечены значения сжимающих напряжений при комнатной температуре, кругами – значения напряжений разного знака, возникающие при

одновременном воздействии механической нагрузки и повышенных температурах

В ЛНФ ОИЯИ (г. Дубна) 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 (таблица 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 указывает на существенное влияние температурного режима фазового перехода на физические характеристики кварцита. Оцененные значения решеточных напряжений при температурах фазового перехода значительно (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 сильных концентраций локальных напряжений, приводящих к возникновению локальных деформаций и микротрещин.

### У.ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 с актуальными исследованиями горных пород, минералов, осколков метеоритов и льдов, проводимыми методами нейтронографии.

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 упруго-пластических геоматериалах при стеснении локализационная неустойчивость является одной из возможных форм первичной неустойчивости, и что она отличается от традиционной локализации сдвига-растяжения в тонких слоях.

Существенно, что нейтронно-дифракционные эксперименты с одновременной регистрацией акустической эмиссии позволяют наблюдать развитие процессов деформирования и трещинообразования на разных масштабных уровнях: от искажений кристаллической структуры до разрушения в масштабах образца. Эта особенность расширяет возможности для совершенствования уже известных моделей очага землетрясения и для формулирования принципиально новых представлений [21,22].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Соболев Г.А., Никитин А.Н.* // ЭЧАЯ. 32, 6, 1359(2001)
- [2] *Kocks U.F., Tomé C.N., Wenk H.-R.* Texture and anisotropy. Cambridge university press. 676 p.(1998)
- [3] *Баяк Е.И., Воларович М.П., Левитова Ф.М.* Упругая анизотропия горных пород при высоких давлениях. М: Наука. 169 с. (1982)
- [4] *Karato S.-I.* // in: Research in Mineral Physics. Orlando. FL: Academic Press. 455(1987)
- [5] *Александров К.С., Продайвода Г.П.* Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. Новосибирск. Изд-во СО РАН. 354с.(2000)
- [6] *Ullemeyer K., Spalhoff P., Heinitz J. et al.* // Nucl.Instrument Meth.Phys.Res. A. 412, 1, 80(1998)
- [7] *Feldmann K., Betzl M., Kleinsteuber W. et al.* // Textures & Microstructures, 14-18, 59(1991)
- [8] *Ivankina T.I., Nikitin A.N., Locajicek T. et al.* // in : "Proc. ICOTOM-12", J.A.Szpunar, Ed. NRC Research Press, Ottawa, Canada. 2, 1587(1999)
- [9] *Вальтер К., Исаков Н.Н., Никитин А.Н. и др.* // Физика Земли. 6, 37(1993)
- [10] *Scheffzük Ch., Frischbutter A., Walther K.* // Schr. f. Geowiss. 6, 39(1998)
- [11] *Walther K., Frischbutter A., Scheffzük Ch.* // II German- Russian User Meeting "Condensed Matter Physics with Neutrons at IBR-2". Dubna, April 21-25. 6(2001)
- [12] *Никитин А.Н., Иванкина Т.И., Буриличев Д.Е. и др.* // Физика Земли. 1, 64(2001)
- [13] *Simmons G, Wang H.* Single crystal elastic constants and calculated aggregate properties: a handbook. Cambridge. Massachusetts. 370 p.(1971)
- [14] *Pros Z.* // in: High pressure and temperature studies of physical properties of rocks and minerals.Kiev: Naukova Dumka. 56 p.(1977)
- [15] *Райс Дж.* Механика очага землетрясения. М:Мир. 217 с.(1982)
- [16] *Касахара К.* Механика землетрясений. М:Мир. 263 с.(1985)
- [17] *Соболев Г.А., Никитин А.Н., Савелова Т.И. и др.* // Физика Земли. 1, 6(2001)
- [18] *Ivankina T.I., Nikitin A.N., Telepnev A.S. et al.* // High Pressure Research. 17, 335(2000)
- [19] *Widhalm C., Tshegg E., Eppensteiner W.* // J. Perform. Const. Facilit. ASCE. 10, 5(1996)
- [20] *Ivankina T.I., Nikitin A.N., Ullemeyer K. et al.* // Schr. f. Geowiss. 6, 49(1998)

[21] Никитин А.Н., Васин Р.Н., Балагуров А.М. др. Исследование тепловых и деформационных свойств кварцита в температурной области полиморфного  $\alpha$ - $\beta$  перехода методами нейтронной дифрактометрии и акустической эмиссии. Письма в журнал «Физика элементарных

частиц и атомного ядра», том 3, № 1(130) (2006)

[22] Родкин М.В., Никитин А.Н., Васин Р.Н. Сейсмоструктурные эффекты твердотельных превращений в геоматериалах. М.: Геос, 198 с. (2009)

## **Studies of Intracrystalline Strain, Texture and Properties of Rocks using Neutron Diffraction**

**T.I.Ivankina<sup>1</sup>, T. Lokcajicek<sup>2</sup>, A.N.Nikitin<sup>1</sup>, D. Sangaa<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>*Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Geology, Czech Academy of Sciences, Prague, Czech Republic*

<sup>3</sup>*Institute of Physics and Technology of Mongolian Academy of Sciences, Ulaan-Baatar, Mongolia*

The principle advantages of neutron diffraction based on phenomenal properties of neutron which permit to extend a range of solid-state physics problem are analyzed in the paper in detail. The basic part of the review contains 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. Results of study of anisotropic 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.