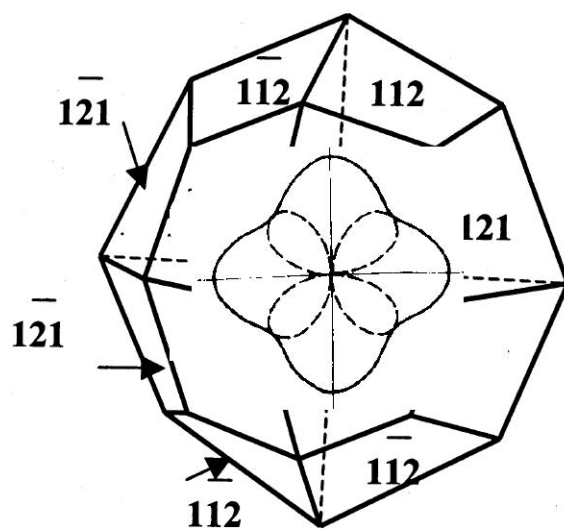


Российская академия наук

Ф.Ф. Горбацевич

# Акустополярископия породообразующих минералов и кристаллических пород



Апатиты

2002

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Кольский научный центр  
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ



*Ф.Ф. Горбачев*

# **Акустопольярикопия породообразующих минералов и кристаллических пород**

Апатиты

2002

**УДК 550.311**

**Ф.Ф. Горбацевич. Акустополарископия породообразующих минералов и кристаллических пород. Апатиты: изд. Кольского научного центра РАН, 2002. – 152 с.**

В работе кратко изложены основы метода акустополарископии, результаты определений упругих и неупругих свойств некоторых породообразующих минералов и горных пород. В образцах природных минералов и породах обнаружены ранее неизвестные эффекты, - линейная акустическая анизотропия поглощения и деполяризация сдвиговых волн. Книга предназначена для специалистов, работающих в областях акустики, геофизики, геологии, а также теории и практики определения свойств твердых тел.

Работа выполнена по гранту № 97-05-64167 Российского фонда фундаментальных исследований. Она также частично выполнена по Проекту МПГК № 408 ЮНЕСКО.

© Ф.Ф. Горбацевич, 2002

**Russian Academy of Sciences**

Kola Science Centre RAS

*Geological Institute*



*F.F. Gorbatsевич*

**ACOUSTOPOLARISCOPY OF ROCK FORMING  
MINERALS AND CRYSTALLINE ROCKS**

Apatity

2002

**F.F. Gorbatsevich. Acoustopolariscopy of rock forming minerals and crystalline rocks.**  
Apatity: Kola Sci. Centre RAS, 2002. 152 c.

**The fundamentals of the acoustopolariscopy method, determination results for elastic and non-elastic properties of some rock forming minerals and crystalline rocks are outlined in the work. Previously unknown effects – linear acoustic anisotropic absorption and depolarization of shear waves have been revealed in the samples of naturally occurring minerals and rocks. The book is destined for specialists dealing with acoustics, geophysics, geology as well as theory and practice of determining solid body properties.**

**The work was supported financially by the Russian Foundation for Basic Research through project grant 97-05-64167. Partly the work was fulfilled in the framework of IGCP-UNESCO Project № 408.**

© F.F. Gorbatsevich, 2002

## РЕФЕРАТ

Физическая анизотропия принадлежит к одной из интереснейших форм организации материи, пока еще не полно исследованных. Изучение анизотропии упругих свойств твердых сред наиболее важно, так как с этими характеристиками связано поведение и изменение под нагрузкой большого числа разнообразных элементов конструкций, природных объектов и материалов.

В предлагаемой работе кратко изложены основы метода акустополярископии, описаны необходимые приборы и результаты определений упругих и неупругих свойств некоторых порообразующих минералов и кристаллических пород.

Главным результатом исследований является открытие новых явлений: линейной акустической анизотропии поглощения и деполяризации сдвиговых волн в порообразующих минералах и кристаллических породах. Эффект линейной акустической анизотропии поглощения является аналогом широко известного явления в оптике, - плеохроизма (дихроизма). В образцах природных силикатных минералов (амфибола, ортоклаза, микроклина и др.) зарегистрировано значительное проявление этого эффекта. Отмечена зависимость степени проявления эффекта от частоты зондирующих колебаний. Например, в микроклине, также как и в ортоклазе, при одной частоте наибольшее поглощение происходит на структурных элементах одной спайности, при другой – на элементах другой. Явление деполяризации сдвиговых волн возникает при разориентированных элементах упругой симметрии в слоях или зернах, слагающих, например, горную породу. Это явление зарегистрировано в образцах песчаника, туфа андезито-базальта, биотит-плагиоклазового гнейса, роговообманкового амфиболита и др. Среди минералов оно наблюдалось в образце турмалина. Явление позволяет оценить угол разориентировки элементов упругой симметрии в зернах (слоях) моно- и полиминеральных горных пород.

Показано, что метод акустополярископии позволяет определить пространственную ориентировку и относительную величину компонент поля палеонапряжений в метаморфизованной породе. Как показано, тип упругой симметрии метаморфизованной горной породы определяется видом поля палеонапряжений, действовавшего в период этапа метаморфических преобразований.

Работа выполнена по гранту № 97-05-64167 Российского фонда фундаментальных исследований. Она также частично выполнена по Проекту МПК № 408 ЮНЕСКО.

Табл.10, Илл.56, Прил.2.

## ABSTRACT

Physical anisotropy belongs to one of the most interesting forms of matter that is still not completely studied. An investigation of anisotropy of solid media elastic properties is most important since the behaviour and change of a large number of various elements of constructions, natural objects and materials under load are related to those properties.

In this work the fundamentals of the acoustopolariscopy method, devices, determination results for elastic and non-elastic properties of some rock forming minerals and rocks are outlined.

The main investigation result is a discovery of some new phenomena: linear acoustic anisotropic absorption and depolarization of shear waves in rock forming minerals and crystalline rocks. The effect of linear acoustic anisotropic absorption is an analogue of a well-known phenomenon in optics – pleochroism (dichroism). This effect was first discovered in the rocks of the lower section of the Kola superdeep borehole. A marked manifestation of this effect has been also registered in the samples of natural silicate minerals (amphibole, orthoclase, microcline et al.). Dependence of the effect manifestation degree on the frequency of sounding waves has been noted.

If the elastic symmetry elements in layers or grains constituting an anisotropic medium are mutually disoriented within  $10-80^\circ$ , propagation of linear-polarized shear waves in the directions close to the normal to the disorientation plane is accompanied by their depolarization, i.e. the increase in their ellipticity grade. This phenomenon is called the effect of shear wave depolarization. The depolarization phenomenon has been registered in the samples of sandstone, andesite basaltic tuff, biotite plagioclase gneiss, hornblende amphibolite et al. Among minerals this phenomenon has been registered in a tourmaline sample. The phenomenon enables to assess a disorientation angle of elastic symmetry elements in grains (layers) of mono- and polymineral rocks.

It is shown that the acoustopolarization method allows one to define spatial orientation and relative values of palaeostresses field components in metamorphosed rocks. In this connection the correspondence principle between the palaeostresses field parameters and anisotropy type transformed by this field of a metamorphosed crystalline rock is presented in the work. According to this principle in the palaeostresses field where three main components are not equal to each other, the crystalline rock acquires an orthorhombic symmetry type. In the palaeostresses field where two components are equal to each other and the third one differs from them in value, the rock acquires transversely isotropic symmetry type.

The work was supported financially by the Russian Foundation for Basic Research through project grant 97-05-64167. Partly the work was fulfilled in the framework of IGCP-UNESCO Project № 408.

Tables 10, Figures 56, Annexes 2.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Физическая анизотропия является одной из интереснейших форм организации материи, пока еще не полностью изученных. Наиболее ярко ее значение и особенности проявились при изучении минералов. Для этой цели с начала XIX века используется микроскоп. После введения в микроскоп в 1828 г. Уильямом Николем поляризаторов оптические методы заняли важнейшее место при изучении минералов. Внутренние законы их построения позволили Е.С.Федорову создать законченную классификацию 230 пространственных точечных групп симметрии, связанную с анизотропией оптических, диэлектрических, магнитных, упругих, термических и других свойств. Среди них изучение анизотропии упругих свойств наиболее важно, так как с этими свойствами связано поведение под нагрузкой большого числа разнообразных элементов конструкций, природных объектов и материалов. Теория упругой анизотропии сред основательно разработана в трудах А.Лява, В.Фойгта, Дж.Найя, Ф.И.Федорова, С.Г.Лехницкого, Г.И.Петрашеня и других. Значительно худшее положение наблюдается в области экспериментальных методов ее изучения. Использование для этой цели оптических поляризационных методов с одной стороны ограничено тем, что оптические постоянные упругости среды описываются тензором не выше второго порядка, в то время как постоянные упругости среды низшей симметрии - тензором четвертого порядка. С другой стороны, область изучения оптическими методами многих объектов, в частности, горных пород, ограничена их непрозрачностью.

Потребность в разработке теории и методов изучения упругой анизотропии твердых сред и, в частности, минералов и горных пород очень значительна - без них не может быть адекватно осуществлена интерпретация данных геофизической разведки, сейсмоки и сейсмологии.

Значительный прогресс в этих направлениях обеспечен работами Л.Бергмана, Л.М.Бреховских, Г.А.Буденкова, Е.И.Гальперина, А.Н.Гузя, Э.Дьелесана, К.Е.Ермилина, Г.Кольского, С.Крэмпина, В.Е.Лямова, Р.Лукаса, Ф.М.Ляховицкого, У.Мезона, М.В.Невского, Ж.Г.Никифоренко, А.Нура, В.М.Прохорова, Н.Н.Пузырева, Д.Руайе, Р.Симмонса, Е.Скучика, Р.Т.Смита, Л.Томсена, Дж.Э.Уайта, Е.М.Чеснокова и других. В большей степени, для определения параметров анизотропии применяется динамический ультразвуковой метод, быстрое совершенствование которого стало возможным благодаря работам С.Я.Соколова, Д.С.Шрайбера, К.С.Александрова, Б.П.Беликова, И.Н.Ермолова, Г.Т.Продайводы, Т.В.Рыжовой, Н.Н.Силаевой, В.С.Ямщикова, О.Г.Шаминой, В.Л.Шкуратника и других.

В предлагаемой работе кратко изложены теоретические основы распространения упругих, в основном, поперечных (сдвиговых) колебаний в твердых телах, причем основное внимание уделяется



вопросам практических измерений свойств анизотропных сред. Даны основы метода акустополаризационных измерений. Объяснена физическая суть эффекта линейной анизотропии поглощения (акустического дихроизма). На основе анализа законов отражения на полупространстве и отражения-прохождения на границе раздела сред рассматриваются пути создания эффективных чисто поперечных линейно-поляризованных излучателей и приемников колебаний. Изложены результаты разработки и испытаний конструкций комбинированных преобразователей для излучения и приема продольных и сдвиговых колебаний. Описаны конструкции акустополарископов, в том числе автоматизированного прибора, имеющего механический привод и соединенного с персональным компьютером. Изложены приемы обработки результатов измерений, определения типа симметрии и констант упругости анизотропных сред. Даны правила для расчета констант, анализа сред ромбической, тетрагональной, псевдогексагональной, кубической и изотропной симметрий. Вместе с этим показано, что по числу выявленных элементов симметрии возможен анализ сред более низких форм симметрии, - триклинной и моноклинной.

Заключительные разделы посвящены результатам экспериментального изучения упругой анизотропии породообразующих минералов и пород некоторых месторождений (Воче-Ламбинский полигон, Кольский п-ов, Кольская и Уральская сверхглубокие скважины). На породах Воче-Ламбинского полигона показана возможность определения направленности и сравнительной величины палео- и современных напряжений.

Главным результатом исследований является открытие новых явлений: линейной акустической анизотропии поглощения и деполаризации сдвиговых волн в породообразующих минералах и кристаллических породах.

Книга предназначена для специалистов, работающих в области теории и практики определения свойств твердых тел. Книга может быть полезна акустикам, геофизикам и геологам.

Автор выражает искреннюю благодарность О.С.Головатой, А.В.Жарикову, Н.Г.Жихаревой, С.Б.Имашевой, В.Л.Ильченко, Н.Керну (Германия), Ю.М.Кирнарскому, Н.Е.Козловой, П.В.Крауклису, Р.В.Медведеву, Ф.П.Митрофанову, Ю.Н.Нерадовскому, З.В.Нечмир, Л.Л.Панасьян, И.А.Паниной, Г.И.Петрашню, Н.Н.Тесовской, В.Н.Федькину, Н.В.Шарову, В.Л.Шкуратнику, Ю.Н.Яковлеву за поддержку, доброжелательное отношение, ценные советы и помощь при подготовке монографии.

Автор выражает искреннюю признательность Н.Н.Девниной, С.В.Икорскому, А.М.Карпунину, Ю.М.Кирнарскому, К.И.Полякову, Ю.П.Смирнову, В.И.Старостину А.К.Шпаченко за предоставленные

образцы минералов и пород, полезные консультации и обсуждение результатов экспериментов.

Автор благодарит Джорджа Сороса, основателя Международного научного фонда и Российский Фонд фундаментальных исследований. Данная монография издана за счет гранта чрезвычайной помощи фонда Сороса и на основе финансирования грантов № № 94-05-16034а, 97-05-64167 Российского Фонда фундаментальных исследований.

Работа выполнена по гранту № 97-05-64167 Российского фонда фундаментальных исследований. Она также частично выполнена по Проекту МПГК № 408 ЮНЕСКО.

# 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА АКУСТОПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

## 1.1. Распространение упругих колебаний в поперечно-изотропной среде

Распространение упругих колебаний в анизотропных средах в общем виде описывается уравнением Грина-Кристоффеля (Джелесан и Руайе, 1982):

$$(\Gamma_{ik} - \delta_{ik}\rho V^2)U_i = 0, \quad (1.1)$$

где  $\Gamma_{ik} = n_j n_k C_{ijkl}$  – тензор Кристоффеля,  $C_{ijkl}$  – константы упругости анизотропного твердого тела,  $n_j, n_k$  – направляющие косинусы,  $\delta_{ik}$  – символ Кронекера,  $\rho$  – плотность среды,  $V$  – скорость распространения волны,  $U_i$  – смещение частиц среды в волне.

Для относительно простой, но практически широко представленной поперечно-изотропной среды компоненты  $\Gamma_{ik}$  примут следующие значения:

$$\Gamma_{11} = n_1^2 C_{11} + n_2^2 C_{66} + n_3^2 C_{44}$$

$$\Gamma_{22} = n_1^2 C_{66} + n_2^2 C_{11} + n_3^2 C_{44}$$

$$\Gamma_{33} = n_1^2 C_{44} + n_2^2 C_{44} + n_3^2 C_{33}$$

(1.2)

$$\Gamma_{12} = (C_{12} + C_{66})n_1 n_2$$

$$\Gamma_{13} = (C_{13} + C_{44})n_1 n_3$$

$$\Gamma_{23} = (C_{23} + C_{44})n_1 n_3$$

где  $C_{ij}$  – константы упругости анизотропного твердого тела,  $n_i$  – направляющие косинусы.

Эти значения  $\Gamma_{ik}$  могут быть подставлены в уравнение (1.1) и тем самым получено полное уравнение Грина-Кристоффеля для поперечно-изотропной среды. Собственные значения тензора Кристоффеля определяют три независимых решения – три величины скорости распространения упругих колебаний в одном направлении. Рассмотрим два простых случая распространения упругих колебаний в поперечно-изотропной среде.

1. Упругая волна распространяется вдоль оси симметрии  $OX_3$ . При этом  $n_1 = n_2 = 0, n_3 = 1$ . Из уравнения Грина-Кристоффеля получим, что  $(C_{33} - \rho V^2) (C_{44} - \rho V^2) (C_{44} - \rho V^2) = 0$ . Откуда следует, что величины скорости распространения упругих колебаний

$$V_{p1} = \sqrt{C_{33}/\rho}, V_{s1} = V_{s2} = \sqrt{C_{44}/\rho} \quad (1.3)$$

Таким образом, при распространении упругих колебаний вдоль оси симметрии среды будут наблюдаться только две скорости  $V_{p1}$  и  $V_{s1} = V_{s2}$ . Измеряя только эти параметры скорости, нельзя сделать заключение, является ли такая среда анизотропной.

2. Упругая волна распространяется вдоль оси  $OX_1$  (ее направление распространения лежит в плоскости симметрии среды). При анализе анизотропных сред такой случай наиболее интересен. При этом  $n_1 = 1, n_2 = n_3 = 0$ . Из общего уравнения (1.1) находим, что

$$(C_{11} - \rho V^2) (C_{66} - \rho V^2) (C_{44} - \rho V^2) = 0.$$

Последнее уравнение имеет три решения:

$$V_{p2} = \sqrt{C_{11}/\rho}, V_{s1} = \sqrt{C_{44}/\rho}, V_{s2} = \sqrt{C_{66}/\rho}, \quad (1.4)$$

где  $V_{p2}$  - скорость продольной волны вдоль плоскости симметрии;  $V_{s1}$  - скорость сдвиговой волны в том же направлении, при векторе поляризации, направленном по нормали к плоскости симметрии;  $V_{s2}$  - скорость сдвиговой волны, при векторе поляризации, лежащем в плоскости симметрии. Аналогичным образом, при  $n_1 = 1, n_2 = n_3 = 0$  из уравнений (1.2) получим, что  $\Gamma_{11} = C_{11}, \Gamma_{22} = C_{66}, \Gamma_{33} = C_{44}$ . Тогда уравнение Грина-Кристоффеля можно заменить тремя уравнениями движения:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} &= C_{11} \frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2}, \\ \rho \frac{\partial^2 U_2}{\partial t^2} &= C_{44} \frac{\partial^2 U_2}{\partial x^2}, \\ \rho \frac{\partial^2 U_3}{\partial t^2} &= C_{66} \frac{\partial^2 U_3}{\partial x^2}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Самыми простыми решениями волновых уравнений (без учета поглощения, для гармонических стационарных колебаний) являются выражения:

$$\begin{aligned}
 A_{p2} &= A_0 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi f_0 x}{V_{p2}} + \varphi_0\right), \\
 A_{s1} &= A_0 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi f_0 x}{V_{s1}} + \varphi_0\right), \\
 A_{s2} &= A_0 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi f_0 x}{V_{s2}} + \varphi_0\right),
 \end{aligned}
 \tag{1.6}$$

где  $\omega = 2\pi f_0$  - круговая частота колебаний,  $x$  - расстояние,  $\varphi_0$  - начальный фазовый сдвиг.

## 1.2. Разность фазы и фазовый сдвиг в волне сдвиговых колебаний

Рассмотрим относительно простой, но сравнительно широко известный случай распространения сдвиговой волны в среде поперечно-изотропной симметрии. Будем считать, что в образце, изготовленный из поперечно-изотропной среды, колебания передаются от излучателя линейно-поляризованных стационарных гармонических сдвиговых колебаний в направлении, совпадающем с плоскостью упругой симметрии  $[010]$  (рис.1.1).

В этом случае возмущения, возникающие в образце, будут описываться суперпозицией амплитуд  $A_{s1}$  и  $A_{s2}$ . Вид поляризации суммарной сдвиговой волны будет зависеть от положения вектора  $A$  по отношению к элементам симметрии среды и пути распространения волны  $x$ . Если вектор  $A$  будет лежать в плоскости  $[010]$ , то гармоническая фаза волны вдоль этого направления будет

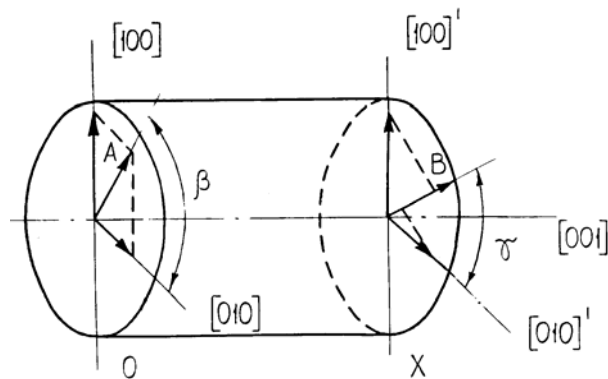


Рис.1.1. Схема регистрации квази-сдвиговой волны, проходящей через образец поперечно-изотропной симметрии при произвольном ориентированных векторах поляризации (ОВП) излучателя и приемника колебаний.

описываться выражением

$$\Psi_1 = \omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_1} + \varphi_0.$$

Вдоль направления [100] гармоническая фаза

$$\Psi_2 = \omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_2} + \varphi_0,$$

где  $\lambda_1 = V_{s1}/f_0$ ,  $\lambda_2 = V_{s2}/f_0$ .

На расстоянии  $x$  от сечения [010]-[100] возникнет разность фазы

$$\delta = \Psi_1 - \Psi_2 = 2\pi x(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2). \quad (1.7)$$

За счет разности фазы  $\delta$  вдоль пути распространения будет наблюдаться смена вида поляризации и изменение ориентации вектора поляризации (ОВП) суммарной сдвиговой волны (Лямов, 1983). Если задать вектору  $A$  (рис.1.1) угол  $\beta = 45^\circ$  или  $135^\circ$ , то при разности фазы  $0 < \delta < \pi/2$  (рис.1.2) поляризация волны из линейной перейдет в эллиптическую правую, с ориентацией большой оси эллипса, совпадающей с ОВП при величине  $\delta = 0$ .

Когда разность фазы достигнет значения  $\delta = \pi/2$  будет наблюдаться круговая правая поляризация. При разности фазы  $\pi/2 < \delta < \pi$  поляризация снова станет эллиптической. Однако теперь большая ось эллипса будет повернута на угол  $90^\circ$  по сравнению с ОВП при  $\delta = 0$ . Далее, при  $\delta = \pi$  поляризация станет линейной, причем ориентация вектора поляризации также составит угол  $90^\circ$  по отношению к ОВП при  $\delta = 0$ . В пределах разности фазы  $\pi < \delta < 2\pi$  наблюдается левое вращение вектора поляризации. Вид и параметры поляризации одинаковы для  $\delta = 5\pi/4$  и  $\delta = 3\pi/4$  (эллиптическая), для  $\delta = 7\pi/4$  и  $\delta = \pi/4$  (эллиптическая), для  $\delta = 3\pi/2$  и  $\delta = \pi/2$  (круговая). Как следует из рис.1.2, вид поляризации, направление вращения и ориентировка вектора поляризации полностью совпадают при разности фазы, равной  $2\pi$ . Если разность фазы по длине образца в точности равна  $\delta = 2\pi$ , вид и параметры поляризации не дают возможности отличить анизотропный образец от изотропного.

Рассмотрим процесс распространения квазисдвиговой волны в образце, рис.1.1, при произвольной ориентировке вектора поляризации излучателя  $A$  и приемника  $B$  колебаний.

Например, ориентация вектора поляризации излучателя составляет угол  $\beta$  с плоскостью симметрии  $[010]$  образца, его амплитуда равна  $A_S$ .

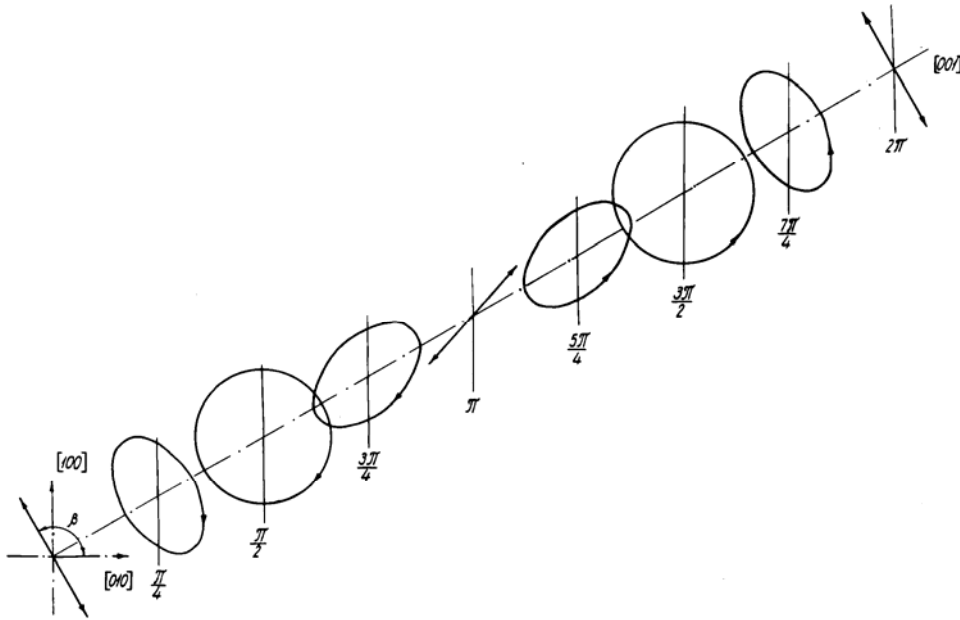


Рис. 1.2. Смена вида поляризации при распространении волны сдвиговых колебаний в анизотропном образце.

Ориентация вектора поляризации приемника колебаний составляет угол  $\gamma$  с этой же плоскостью  $[010]$ , его чувствительность равна  $A_R$ . Выполнив разложение вектора поляризации  $A$  излучателя по элементам симметрии  $[010]$  и  $[100]$ , а на расстояние  $x$  сложение проекций на направление  $B$ , рис.1.1, получим, с учетом уравнения (1.6), суммарную амплитуду колебаний  $A_P$ , регистрируемую приемником:

$$A_P = A_S A_R \left[ \cos \beta \cos \gamma \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_1} + \varphi_0\right) + \sin \beta \sin \gamma \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_2} + \varphi_0\right) \right]. \quad (1.8)$$

Проследим изменение амплитуды  $A_P$  при повороте образца вокруг направления  $[001]$ . Если ориентация векторов  $A$  и  $B$  преобразователей совпадают, т.е. векторы поляризации излучателя и приемника параллельны (положение ВП), то из (1.8) получим

$$A_{VP} = A_S A_R \left[ \cos^2 \beta \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_1} + \varphi_0\right) + \sin^2 \beta \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_2} + \varphi_0\right) \right]. \quad (1.9)$$

Если векторы поляризации излучателя и приемника направлены под прямым углом, скрещены (положение ВС), то из (1.8) получим

$$A_{VC} = \frac{1}{2} A_S A_R \sin 2\beta \left[ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_1} + \varphi_0\right) - \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_2} + \varphi_0\right) \right]. \quad (1.10)$$

Как следует из уравнений (1.9)-(1.10), амплитуды  $A_{VP}$  и  $A_{VC}$  зависят от длины образца  $x$ , угла поворота  $\beta$  относительно плоскости [010] и текущей фазы колебаний  $\omega t$ . В общем случае при  $\beta = 0$  колебания  $\omega t$  получают фазовый сдвиг. Величина фазового сдвига зависит от угла  $\beta$  и величины разности фазы  $\delta$ .

Решения уравнений (1.9) и (1.10) при  $A_{VP} = 0$ ,  $A_{VC} = 0$ , позволяет найти величины этого фазового сдвига для положения ВП ( $\omega_{n0}$ ) и для ВС ( $\omega_{c0}$ )

$$A_{VP} = A_S A_R [\cos^2 \beta \sin \omega t + \sin^2 \beta \cos \delta \sin \omega t + \sin^2 \beta \sin \delta \cos \omega t] = 0,$$

откуда

$$\omega_{n0} = \arctg \frac{-\sin \delta}{\operatorname{ctg}^2 \beta + \cos \delta} \pm n\pi. \quad (1.11)$$

Аналогично, для  $A_{VC}$  получим

$$A_{VC} = \frac{1}{2} A_S A_R \sin 2\beta [\sin \omega t - \sin \omega t \cos \delta - \cos \omega t \sin \delta] = 0,$$

откуда

$$\omega_{c0} = \arctg \frac{\sin \delta}{1 + \cos \delta} \pm n\pi, \quad (1.12)$$

где величина  $\delta$  определяется выражением (1.7),  $n = 0, 1, 2, 3 \dots$

На рис. 1.3 приведена зависимость фазового сдвига  $\omega t_c$  ( $\omega_{n0}$ ), рассчитанная по формуле (1.11), которая будет наблюдаться при параллельных векторах излучателя и приемника колебаний (Горбачевич, 1995).



Как следует из этого рисунка, при  $\delta = 0, 180^0$ ,  $\omega_{n0} = 0$  при любом  $\beta$ . Наибольшие изменения величины фазового сдвига  $\omega_{n0}$  наблюдаются при  $\beta \rightarrow 90^0$  ( $270^0$ ) и  $\delta \rightarrow 90^0$  ( $270^0$ ). Величина фазового сдвига  $\omega_{n0}$  является четной относительно знака угла  $\beta$ , однако в зависимости от величины  $\delta$  она может принимать как отрицательные, так и положительные значения. Величина сдвига текущей фазы колебаний  $\omega_{co}$  при скрещенных векторах (положение ВС) преобразователей зависит только от разности фазы  $\delta$ . Аналогично, при  $\delta = 0, 180^0$  угол  $\omega_{co} = 0$ . Из формулы (1.12) следует, что по величине  $\omega_{co}$  можно рассчитать разность фазы  $\delta$ .

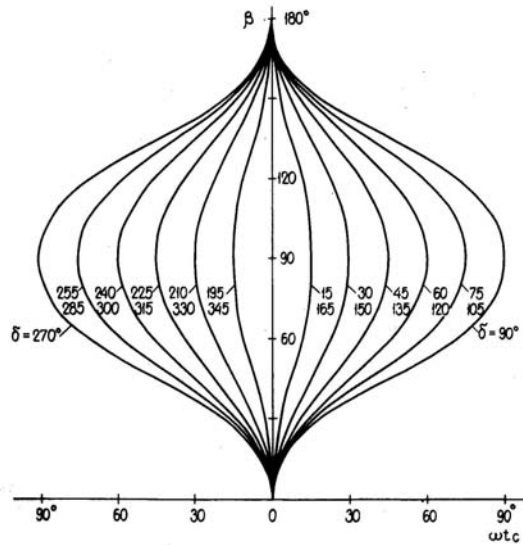


Рис.1.3. Зависимость величины фазового сдвига  $\omega_{tc} = \omega_{no}$  от углов  $\beta$  и  $\delta$  при положении ВП излучателя и приемника.

### 1.3. Изменения огибающей стационарных сдвиговых колебаний

Исследуем более подробно уравнение (1.8). Применим теорему Ферма и найдем значения круговой частоты  $\omega_{nm}$ , при которых амплитуда  $A_{BM}$  принимает максимальную величину:

$$\frac{\partial}{\partial \omega t} A_S A_R [\cos^2 \beta \sin \omega t + \sin^2 \beta \cos \delta \sin \omega t + \sin^2 \beta \sin \delta \cos \omega t] = 0$$

Из последнего:

$$\cos^2 \beta \cos \omega_{nm} + \sin^2 \beta \cos \delta \cos \omega_{nm} - \sin^2 \beta \sin \delta \sin \omega_{nm} = 0,$$

откуда

$$\omega_{nm} = \arctg \frac{1}{\sin \delta} (\ctg^2 \beta + \cos \delta) \pm n\pi. \quad (1.13)$$

Теперь, подставив полученное значение  $\omega_{nm}$  вместо значения  $\omega t$  в уравнение (1.9), получим уравнение огибающей суммарного колебания на входе приемного преобразователя (положение ВП)

$$A_{VPM} = A_S A_R \sqrt{\cos^4 \beta + 2 \cos^2 \beta \sin^2 \beta \cos \delta + \sin^4 \beta}. \quad (1.14)$$

Аналогичным образом выполним анализ по отношению к уравнению (1.10)

$$\frac{\partial A_{VC}}{\partial \omega t} = \frac{\partial}{\partial \omega t} \frac{1}{2} A_S A_R \sin 2\beta [\sin \omega t - \sin(\omega t + \delta)] = 0.$$

Из последнего уравнения

$$\omega_{cm} = \arctg \frac{\cos \delta - 1}{\sin \delta} \pm n\pi \quad (1.15)$$

Подставив полученное значение  $\omega_{cm}$  вместо  $\omega t$  в уравнение (1.10), получим уравнение огибающей гармонических колебаний на входе приемного преобразователя в положении ВС

$$A_{VCM} = A_S A_R \sin 2\beta (\delta/2). \quad (1.16)$$

Уравнения (1.11)-(1.16) определяют важные свойства амплитуд  $A_{VP}$  и  $A_{VC}$  и их огибающих, наблюдаемых при параллельных и при скрещенных векторах поляризации преобразователей. Уравнения (1.11) и (1.13), а также (1.12) и (1.15) показывают, что

$$\omega_{nm} = \omega_{no} \pm 90^\circ,$$

$$\omega_{cm} = \omega_{co} \pm 90^\circ.$$

Это означает, что углы  $\omega t = \omega_{no}$  и  $\omega t = \omega_{co}$ , при которых наблюдается равенство нулю амплитуд  $A_{VP}$  и  $A_{VC}$ , сдвинуты относительно максимумов тех же амплитуд на угол  $90^\circ$ .

#### **1.4. Особенности круговых диаграмм при параллельных и скрещенных векторах поляризации**

В соответствии с физическим смыслом, уравнения (1.9) и (1.10) представляют мгновенные значения амплитуд гармонических колебаний в момент времени  $t$ . Регистрация амплитуд  $A_{VP}$  и  $A_{VC}$  возможна, особенно

на больших частотах, лишь при помощи измерительной аппаратуры высокого разрешения как по времени, так и по величине сигнала. При сигнале, близком к гармоническому, более удобно наблюдать изменения максимальных амплитуд (огibaющих) в процессе поворота образца (рис.1.1) при параллельных ( $A_{VPM}$ ) и скрещенных ( $A_{VCM}$ ) векторах поляризации. Поведение амплитуд  $A_{VPM}$  и  $A_{VCM}$  соответственно описывается уравнениями (1.14) и (1.16).

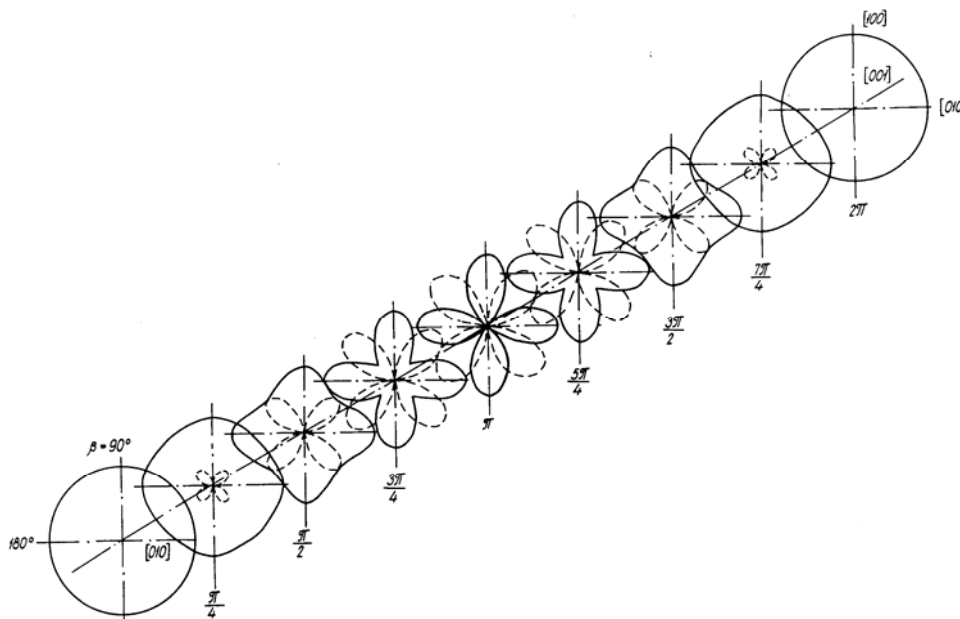


Рис.1.4. Изменения максимальных амплитуд (огibaющих), регистрируемых приемником при параллельных (сплошная линия) и скрещенных (пунктир) векторах поляризации излучателя и приемника сдвиговых колебаний в зависимости от угла поворота образца  $\beta$  и разности фазы  $\delta$ .

Согласно уравнениям, значения  $A_{VPM}$  и  $A_{VCM}$  зависят только от величин угла поворота образца  $\beta$  и разности фазы  $\delta$ . На рисунке 1.4, с шагом  $\delta = \pi/4$  приведены конфигурации огibaющих  $A_{VPM}$  (сплошная линия) и  $A_{VCM}$  (пунктир), наблюдаемые в пределах разности фазы  $0-2\pi$  (Горбачевич,1982).

Как показывает рис.1.4, вне зависимости от угла  $\beta$  поворота изотропного образца ( $\delta = 0$ ) при положении ВП линейно-поляризованных преобразователей сдвиговых колебаний, будет регистрироваться одна и та же амплитуда огibaющей, равная  $A_{VPM}$ . При положении ВС, также вне зависимости от угла  $\delta$ , амплитуда  $A_{VCM} = 0$ .

Конфигурации огibaющих  $A_{VPM}$ ,  $A_{VCM}$ , полученные при вращении анизотропных образцов, в значительной степени зависят от величины разности фазы  $\delta$ . Например, в положении ВП конфигурация  $A_{VPM}$  от

формы круга ( $\delta = 0, 2\pi, 4\pi\dots$ ) постепенно переходит к симметричной четырехлепестковой фигуре ( $\delta = \pi, 3\pi, 5\pi\dots$ ). Причем, вне зависимости от величины  $\delta$ , наибольшие амплитуды  $A_{VPM}$  наблюдаются при совпадении направленности элементов симметрии [010] и [100] с ориентацией векторов поляризации излучателя и приемника. При этих ориентациях величина  $A_{VPM}$  (без учета затухания) не зависит от разности фазы  $\delta$ . Минимумы амплитуд  $A_{VPM}$  будут зарегистрированы при углах поворота  $\beta = 45^\circ \pm n\pi/2$ . Значение  $A_{VPM} = 0$  при тех же углах поворота  $\beta$  и разности фазы  $\delta = (2n - 1)\pi$ .

Конфигурация огибающих  $A_{VCM}$  (рис.1.4) при вращении анизотропного образца между преобразователями в положении ВС, представляет, вне зависимости от разности фазы  $0 > \delta > 2\pi$ , симметричную четырехлепестковую фигуру. Эта фигура описывается функцией  $A_{VCM} \sin 2\beta$ . В зависимости от величины  $\delta$  изменяется лишь амплитуда максимума  $A_{VCM}$ , наблюдаемая при углах поворота  $\beta_m = 45^\circ + n\pi/2$ . Наибольшее значение  $A_{VCM}$  ( $\beta = \beta_m$ ) будет зарегистрировано при  $\delta = \pi, 3\pi, 5\pi\dots$ . Причем достигаемое значение  $A_{VCM}$  равно  $A_{VPM}$  при  $\delta = 0$ . По значению  $A_{VCM}$ , согласно уравнению (1.16), можно вычислить разность фазы  $\delta$ :

$$\delta = \pm \arcsin \frac{A_{VCM}}{A_S A_R \sin 2\beta} + 2n\pi, \quad (1.17)$$

где  $n = 0, 1, 2, 3 \dots$

Вне зависимости от величины  $\delta$  минимумы  $A_{VCM}$  наблюдаются при ориентации элементов симметрии [010], [100], совпадающей с ориентацией вектора поляризации излучателя или приемника колебаний. Таким образом, прямые, проведенные через минимумы конфигурации  $A_{VCM}$ , всегда укажут пространственное положение осей или плоскостей (их проекций) симметрии анизотропной среды, из которой изготовлен образец. На основе данных рис.1.4 и уравнений (1.13), (1.15) можно сделать следующие выводы:

Конфигурации огибающих  $A_{VPM}$ ,  $A_{VCM}$ , названные акустополяриграммами (Горбацевич, 1982) повторяются с шагом разности фазы  $\delta = 2\pi$ . Акустополяриграммы при  $\delta = (n+k)\pi$  идентичны наблюдаемым при  $\delta = (n-k)\pi$ , где  $n = 0, 1, 2, 3 \dots$ , а величина  $k$  может принимать любые дробные значения.

При разности фазы  $\delta = 2\pi$  акустополяриграммы отражают равенства  $A_{VPM} = A_S A_R$ ,  $A_{VCM} = 0$  вне зависимости от угла поворота  $\beta$ . При разности фазы  $\delta = (2n+1)\pi$  акустополяриграммы  $A_{VCM}$  и  $A_{VPM}$  одинаковы, но сдвинуты друг относительно друга на угол  $\beta = 45^\circ$ . Напротив максимума

$A_{VPM}$  всегда расположен минимум  $A_{VCM}$ . Минимумы и максимумы акустополяриграмм следуют с шагом  $90^0$ .

При малых величинах разности фазы  $\delta$  относительные изменения  $A_{VCM}$  в значительной степени более заметны, чем изменения  $A_{VPM}$ . Поляризационные измерения амплитуд, выполненные в положении ВС, позволяют существенно более точно (по сравнению с измерениями в положении ВП) определить пространственную ориентировку осей и плоскостей симметрии анизотропного образца.

Определение наибольших (наименьших) скоростей распространения квазисдвиговой волны следует производить в направлениях прямых, проведенных через центр симметрии акустополяриграммы ВС и минимумы величины  $A_{VCM}$ . Указанные направления отражают пространственную ориентировку осей (плоскостей) симметрии анизотропной среды. Дисперсия скорости распространения упругих колебаний в твердых телах сравнительно мала. Поэтому экспериментальные наблюдения акустополяриграмм  $A_{VPM}$  и  $A_{VCM}$  могут быть выполнены в широком спектре частот, а также с использованием акустических импульсов.

Измерения скорости распространения квазисдвиговых волн в анизотропных средах не должны производиться, из-за обнаруженного сдвига текущей фазы  $\omega t$  (см. рис.1.3), методом слежения за фазой колебаний, или фазокорреляционным методом. Измерения такими методами возможны лишь в тех случаях, когда направление вектора смещения колебаний совпадает с ориентацией элемента (оси или плоскости) упругой симметрии анизотропной среды.

### **1.5. Характер круговых диаграмм при временном разделении сдвиговых импульсов**

Выше были рассмотрены процессы распространения гармонической стационарной волны в анизотропной среде. Однако при практических измерениях чаще всего используют импульсы с гармоническим заполнением, которое образуется за счет колебаний пьезопластины пьезопреобразователя на собственной частоте механического резонанса (Глозман, 1972; Тюлин, 1976).

Продолжительность импульса, крутизна его переднего фронта зависит от формы возбуждающего электрического сигнала и еще больше - от степени демпфирования пьезопластины (Ермолов, 1981).

Вышеприведенные уравнения (1.8-1.15), как и качественная оценка по огибающим, рис.1.4, могут быть применены и тогда, когда в измерениях используются импульсы с гармоническим заполнением. Однако при этом импульсы, распространяющиеся, например, вдоль направлений  $[100]$  и  $[010]$  на длину  $x$  (рис.1.1), не должны пространственно разделиться. Рассмотрим теперь случай, когда по длине

$x$  происходит пространственное разделение импульсов на  $S_1$  и  $S_2$ , рис.1.5. Такое разделение наблюдается при условии

$$T_i > (x/V_1) - (x/V_2), \quad (1.18)$$

где  $T_i$  - длительность импульса.

Как следует из последнего выражения, разделение на  $S_1$  и  $S_2$  может быть реализовано при достаточно "коротком" импульсе ( $T_i$  мало), достаточно большой дистанции распространения  $x$ , большой разнице в величинах скорости распространения сдвиговых колебаний вдоль элементов симметрии среды  $[100]$  и  $[010]$ . Если вектор поляризации излучателя  $A$  и направление наибольшей чувствительности приемника  $B$  ориентировать параллельно друг другу, рис.1.5а, то, согласно уравнению (1.8) амплитуда импульса  $S_1$ , пришедшего первым на расстояние  $x$ , будет равна

$$A_{VP1} = A_S A_R \cos \beta \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_1} + \varphi_0\right), \quad (1.19)$$

а импульса  $S_2$

$$A_{VP2} = A_S A_R \sin \beta \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_2} + \varphi_0\right). \quad (1.20)$$

Соответственно, без учета затухания амплитуда  $A_{VP1} = A = A_{010}''$  при ориентации вектора  $A$ , совпадающей с плоскостью  $[010]$ . Амплитуда  $A_{VP2} = A = A_{100}'$  при ориентации вектора  $A$ , совпадающей с осью  $[100]$ . Также верно, что  $A_{VP1} = 0$  при векторе  $A$ , направленном вдоль  $[100]$ ,  $A_{VP2} = 0$  при  $A$ , направленном вдоль  $[010]$ .

Таким образом, при ВП излучателя и приемника и разделившихся импульсах, положения элементов симметрии среды могут быть

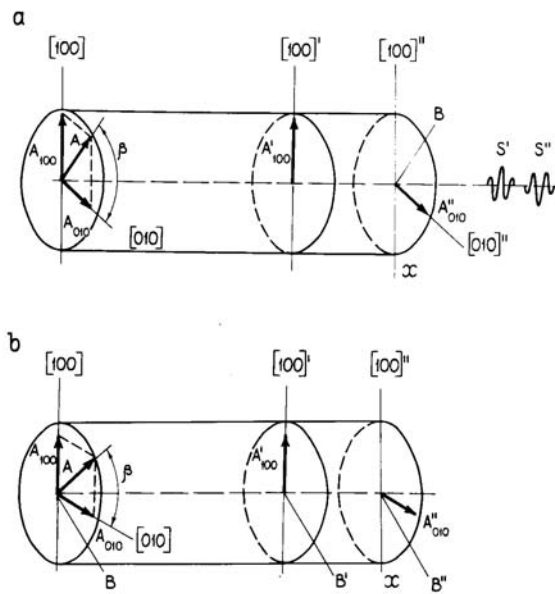


Рис.1.5. Схема прохождения квази-сдвиговой волны через анизотропный образец при пространственно разделившихся импульсах  $S_1$  и  $S_2$ .

достаточно точно определены по моментам угасания импульсов. Например, положение элемента [100] определяется по моменту угасания импульса  $S_1''$ , а элемента [010] - по моменту угасания импульса  $S_2'$ .

Величины  $A_{VP1} = A_{VP2} = \sqrt{2} / 2 A_S A_R$  при  $\beta = 45^\circ \pm n\pi/2$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots$ . Форма круговой диаграммы огибающей (рис.1.6), наблюдаемая при разделившихся импульсах  $S_1''$  и  $S_2'$ , не будет изменяться при увеличении длины образца или частоты  $f_0$ . Изменение круговой диаграммы возможно лишь при проявлении иных эффектов.

Теперь рассмотрим случай, когда ориентации векторов  $A$  и  $B$  скрещены. Как изображено на схеме рис.1.5b, прием колебаний происходит в направлении  $B$ , составляющем  $90^\circ$  с направлением возбуждения  $A$ . Если вектор  $A$  составит угол  $\beta$  с направлением [010], его проекция на направление [010] составит  $A_{010} = A \cos \beta$ , а на направление [100] -  $A_{100} = A \sin \beta$ . Отражая проекции  $A_{010}$  и  $A_{100}$  на направление  $B$  (рис.1.5b), получим, что  $A_{B010} = A \cos \beta \cos(90^\circ - \beta) = A \cos \beta \sin \beta$ ,  $A_{B100} = A \sin \beta \cos \beta$ .

Суммарная амплитуда  $B$  будет равна

$$B = A \cos \beta \sin \beta + A \sin \beta \cos \beta = A \sin 2\beta \quad (1.21)$$

Выражение (1.21), в целом, совпадает с более общим уравнением (1.10). При распространении колебаний, после прохождения времени  $T_i$  произойдет полное разделение импульсов, порожденных составляющими  $A_{010}$  и  $A_{100}$ . Причем более быстрый импульс  $A_{010}$  будет находиться в сечении [100]'-[010]'', а более медленный  $A_{100}$  - в сечении [100]'-[010]'. Соответственно, каждый из них создаст в приемном преобразователе, ориентированном по направлению  $B$ , следующие амплитуды сигналов:

$$A_{VC1} = \frac{1}{2} A_S A_R \sin 2\beta \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_1} + \varphi_0\right), \quad (1.22)$$

$$A_{VC2} = \frac{1}{2} A_S A_R \sin 2\beta \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_2} + \varphi_0\right). \quad (1.23)$$

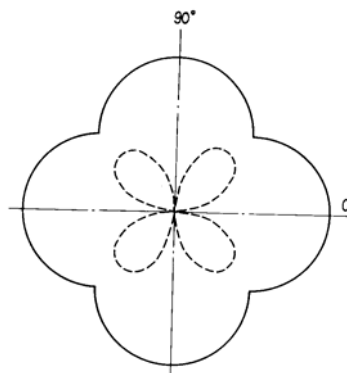


Рис.1.6. Изменения максимальных амплитуд (огибающих) при параллельных (сплошная линия) и скрещенных (пунктир) векторах поляризации излучателя и приемника сдвиговых колебаний, наблюдающиеся при разделившихся импульсах  $S_1$  и  $S_2$ .

Как следует из последних выражений,  $A_{VC1} = A_{VC2} = 0$  при  $\beta = 0 \pm n\pi/2$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots$

Итак, при положении ВС излучателя и приемника и разделившихся импульсах, пространственное положение элементов среды находится по моментам одновременного угасания импульсов  $S_1$  и  $S_2$ . Форма круговой диаграммы ВС, рис.1.6, также не будет изменяться при увеличении длины образца или частоты  $f_0$ . Однако, при наличии, например эффекта линейной акустической анизотропии поглощения (Горбацевич, 1982), с увеличением  $x$  могут происходить качественные изменения этих диаграмм.

В целом, и при разделившихся импульсах наблюдение круговых диаграмм позволяет с высокой точностью определять пространственное положение элементов упругой симметрии изучаемой среды. В этом случае такое определение возможно выполнить как при скрещенных, так и при параллельных векторах поляризации излучателя и приемника сдвиговых колебаний.



## 2. ЭФФЕКТ ЛИНЕЙНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ПОГЛОЩЕНИЯ (ЛААП)

### 2.1. Модели сред, проявляющих ЛААП

Плеохроизм или явление линейной анизотропии поглощения наблюдается при прохождении света через прозрачные среды (Шерклифф, 1965). Оно отражает способность различным образом поглощать луч поляризованного света при повороте его вектора поляризации относительно структурных элементов среды. При этом, как правило, наибольшее поглощение поляризованного света наблюдается в случае, когда вектор поляризации направлен по перпендикуляру к линейно вытянутым структурным элементам среды. Направление наибольшего прохождения света совпадает с ориентацией линейных элементов. Поэтому наблюдаемое явление получило второе название - линейная анизотропия поглощения. Известны природные минералы - турмалин, кунцит, кордиерит, проявляющие эффект оптического дихроизма (Смит, 1980). На основе поливиниловых соединений и других разработаны высокоэффективные поляризаторы обыкновенного света, в которых используется эффект плеохроизма (Жевандров, 1978).

Эффект линейной анизотропии поглощения упругих колебаний изучен и используется в значительно меньшей степени. Рассмотрим, например, устройство, которое может служить пассивным анализатором для цели определения ориентации вектора поляризации сдвиговых поперечных колебаний, излучаемых ультразвуковыми преобразователями (Proctor, 1971). Это устройство представляет собой пачку стеклянных пластин склеенных, например, воском, эпоксидной смолой. Однако, контакт между ними может быть оставлен и сухим. Перпендикулярно торцам пачки стеклянных пластин шлифованы параллельные друг другу рабочие плоскости. Через эти плоскости в устройство направляются пучки лучей сдвиговых колебаний.

При испытаниях подобного пассивного анализатора выявлено, что если вектор поляризации (направление смещения частиц среды в волне сдвиговых колебаний) совпадает с ориентацией стеклянных пластин, то амплитуда колебаний передается через анализатор практически без потерь. Если вектор поляризации повернуть перпендикулярно плоскостям стеклянных пластин, то в анализаторе произойдет почти полное затухание сдвиговых колебаний. Изменение амплитуды проходящих через анализатор сдвиговых колебаний в зависимости от угла поворота вектора поляризации относительно ориентации пластин, как отмечает Т.М.Проктор (1971), близко к косинусоидальной функции. Отклонения от закономерности  $A = A_0 \cos j$  могут быть отнесены за счет неточности отсчета углов и амплитуд. Качество анализатора зависит от длины пути

распространения колебаний в нем и от отношения длины волны к толщине пластин.

Подобный пассивный анализатор можно рассматривать как модель среды, в которой реализуется эффект линейной акустической анизотропии поглощения сдвиговых колебаний (ЛААП). Среди природных образований часто встречаются текстурированные, слоистые, с линейной текстурой среды, в которых наблюдается правильное чередование одних элементов, вытянутых в определенном направлении, с другими. Такое строение свойственно многим кристаллическим горным породам. Поэтому в горных породах следует ожидать проявления ЛААП. Степень его проявления будет зависеть от уровня “организации” структуры образца горной породы, наличия неоднородностей, акустического контраста, его структурных элементов.

Эффект линейной анизотропии поглощения, вероятно, будет проявляться совместно с эффектом упругой анизотропии. Совместный анализ этих эффектов для низкосимметричных сред очень сложен. Поэтому ниже, на некоторых частных примерах, рассмотрим проявление ЛААП в изотропных средах, а также его проявление совместно с эффектом упругой анизотропии при распространении сдвиговых колебаний в наиболее простой, поперечно-изотропной среде. Причем приведенные результаты теоретического анализа не претендуют на полноту и завершенность, так как рассматриваются лишь феноменологические следствия явления.

Для наблюдения ЛААП наибольший интерес представляет анализ круговых диаграмм, полученных при параллельной ориентации векторов поляризации колебаний (положение ВП). Однако при совместном действии эффектов ЛААП и упругой анизотропии следует проследить и изменения в круговых диаграммах, полученных при скрещенных векторах поляризации излучателя и приемника (положение ВС).

## 2.2. Изотропная среда

Представим, что среда, из которой изготовлен анализируемый образец, изотропна и идеально проявляет эффект линейной анизотропии поглощения. Такой образец действует как линейный поляризатор и полностью поглощает сдвиговые колебания при их векторе поляризации, направленном перпендикулярно направлению наибольшего пропускания (НП). Исходя из косинусоидальности функции ЛААП (Proctor, 1971), для амплитуды  $A_{VP}$  принимаемых колебаний, измеренной при параллельных векторах поляризации преобразователей (положение ВП), получим

$$A_{VP} = A_S A_R A_{RE} \cos j \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} + \varphi_0\right), \quad (2.1)$$

где  $A_S$  - амплитуда колебаний, излучаемых излучателем;  $A_R$  - величина наибольшей чувствительности приемника;  $A_{RE}$  - коэффициент пропускания анализатора в направлении НП;  $j$  - угол между направлением векторов поляризации преобразователей и направлением НП;  $\omega$  - круговая частота колебаний;  $t$  - время;  $\lambda$  - длина волны;  $x$  - длина образца;  $\varphi_0$  - начальный фазовый сдвиг. Круговая диаграмма величины  $A_{VP}$  в пределах угла  $j = 2\pi$  приведена на рис. 2.1.

Среда, из которой изготовлен образец, может и не проявлять себя как идеальный линейный поляризатор. В этом случае в направлении, перпендикулярном НП, приемный преобразователь должен зафиксировать некоторую, зависящую от степени проявления ЛААП, амплитуду  $A_{RE}$ . Принимая коэффициент пропускания в направлении, перпендикулярном НП, равным  $A_{RR}$  получим, что в направлении “наибольшего пропускания” коэффициент  $A_{RE} = A_{RN} + A_{RR}$ , где  $A_{RN}$  - дополнительный к  $A_{RR}$  коэффициент пропускания в направлении НП. Уравнение (2.1) для случая неидеального проявления ЛААП получит вид

$$A_{VP} = A_S A_R (A_{RN} \cos j + A_{RR}) \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} + \varphi_0\right). \quad (2.2)$$

Степень проявления ЛААП в образце можно выразить следующим показателем (Акустополаризационные..., 1985),

$$D = \frac{A_{RE} - A_{RR}}{A_{RE} + A_{RR}}, \quad (2.3)$$

где величина  $A_{RE}$  определяется при  $j = 0$ , а  $A_{RR}$  - при  $j = 90^\circ$ . Согласно (2.3) образец, идеально проявляющий ЛААП, имеет степень, равную 1, при отсутствии эффекта  $D = 0$ . На рисунке 2.1 приведены круговые диаграммы изменения амплитуды  $A_{VP}$  (положение ВП) для образцов сред, проявляющих разную степень ЛААП. Если же векторы поляризации

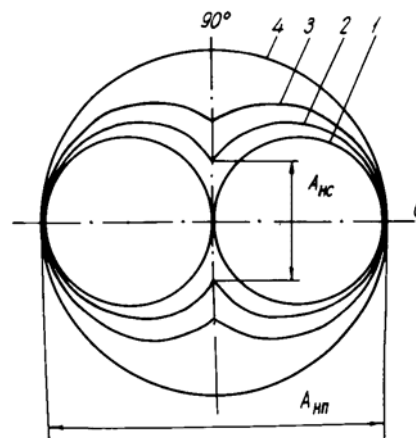


Рис.2.1. Круговые диаграммы изменения амплитуды сдвиговых колебаний, прошедших изотропную среду при разной степени проявления эффекта линейной анизотропии поглощения. 1 -  $D = 1.0$ ; 2 -  $D = 0.5$ ; 3 -  $D = 0.25$ ; 4 -  $D = 0$ .

преобразователей скрестить (положение ВС), то для изотропной среды регистрируемая приемником амплитуда  $A_{VC} = 0$  при любой степени  $D$ .

### 2.3. Поперечно-изотропная среда

Амплитуда сдвиговых колебаний, прошедших образец в направлении, совпадающем с плоскостью изотропии (положение ВП), описываются уравнениями (1.9) и (1.10). При совместном действии эффектов ЛААП и упругой анизотропии, учитывая множитель выражения (2.2), уравнения (1.9) и (1.10) получает вид:

$$A_{VP} = A_S A_R (A_{RN} \cos j + A_{RR}) \left[ \cos^2 \beta \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_1} + \varphi_0\right) + \sin^2 \beta \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_2} + \varphi_0\right) \right] \quad (2.4)$$

$$A_{VC} = \frac{1}{2} A_S A_R (A_{RN} \cos j + A_{RR}) \sin 2\beta \left[ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_1} + \varphi_0\right) - \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_2} + \varphi_0\right) \right]. \quad (2.5)$$

Уравнения (2.4) и (2.5) описывают изменения гармонических амплитуд сдвиговых колебаний, прошедших образец, изготовленный из среды, проявляющей поперечно-изотропную симметрию упругих свойств и эффект линейной анизотропии поглощения, соответственно, в первом случае, когда векторы поляризации излучателя и приемника параллельны, а во втором, - скрещены под углом  $90^\circ$ . При проведении экспериментальных наблюдений ЛААП измерения амплитуды огибающей суммарного колебания удобнее всего осуществлять на входе приемного преобразователя. При наличии эффекта, амплитуда огибающей в положении ВП, уравнение (1.14), с учетом множителя (2.2) будет равна

$$A_{VPM} = A_S A_R (A_{RN} \cos j + A_{RR}) \sqrt{\cos^4 \beta + 2 \cos^2 \beta \sin^2 \beta \cos \delta + \sin^4 \beta}. \quad (2.6)$$

В положении ВС амплитуда огибающей  $A_{VCM}$ , уравнение (1.16), дополнится тем же множителем

$$A_{VCM} = A_S A_R (A_{RN} \cos j + A_{RR}) \sin 2\beta \sin \frac{\delta}{2}. \quad (2.7)$$

Для практического анализа особенностей совместного проявления эффектов упругой анизотропии и ЛААП проследим изменения амплитуд  $A_{VP}$ ,  $A_{VC}$  (их огибающих) в пределах круговых диаграмм ( $\beta = 0 \div 2\pi$ ) для некоторых частных случаев, характеризующихся определенными

фазовыми соотношениями волн, распространяющихся вдоль оси и плоскости симметрии среды, и степенью  $D$ .

**2.3.1. Размер анизотропного образца, выраженный в длинах волн равен:**

$$x = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{4(\lambda_1 - \lambda_2)}.$$

При такой величине  $x$  фаза волны, распространяющейся с вектором поляризации, ориентированном вдоль плоскости упругой симметрии, опережает фазу волны с вектором, направленным вдоль оси симметрии на угол  $\delta = 2\pi$ . Примем также, что направление НП совпадает с плоскостью симметрии среды (угол  $j = \beta$ ). Тогда из (2.4), для амплитуды сигнала, регистрируемого в положении ВП, получим ( $D = 1$ )

$$A_{VP} = A_S A_R A_{RE} \cos \beta [\cos^2 \beta \sin(\omega t + \psi) + \sin^2 \beta (\omega t + \psi)]. \quad (2.8)$$

Для амплитуды сигнала, регистрируемого в положении ВС из (2.5) получим ( $D = 1$ )

$$A_{VC} = \frac{1}{2} A_S A_R A_{RE} \cos \beta \sin 2\beta [\sin(\omega t + \psi) - \cos(\omega t + \psi)]. \quad (2.9)$$

Аналогично, из уравнений (2.6), (2.7) можно получить выражения для огибающих  $A_{VPM}$  и  $A_{VCM}$ . На рисунках 2.2.1-2.2.5 приведены круговые диаграммы изменения огибающих гармонических амплитуд  $A_{VP}$  и  $A_{VC}$  ( $\delta = 90^\circ$ ) в зависимости от угла поворота относительно плоскости упругой симметрии среды.

Круговые диаграммы, рассчитанные для положения ВП, изображены сплошной линией, а для положения ВС - пунктирной. На рисунке 2.2.1 круговые диаграммы приведены для образца, который не проявляет ЛААП ( $D = 0$ ) (Акустополаризационные..., 1985), на рис.2.2.2 - для  $D = 0.25$ , на рис.2.2.3, 2.2.4, и 2.2.5 - для  $D = 0.5$  и  $D = 0.75$ ,  $D = 1$  соответственно.

**2.3.2. Размер анизотропного образца, выраженный в длинах волн равен:**

$$x = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)}.$$

При этом  $\delta = \pi$ . Сохраним условие  $j = \delta$ . Уравнение (2.4) при  $\delta = \pi$  и  $D = 1$  примет вид

$$A_{VP} = A_S A_R A_{RE} \cos \beta \cos 2\beta \sin(\omega t + \psi). \quad (2.10)$$

Из (2.5), при  $\delta = \pi, j = \delta, D = 1$ , получим

$$A_{VC} = A_S A_R A_{RE} \cos \beta \sin 2\beta \sin(\omega t + \psi). \quad (2.11)$$

Круговые диаграммы для случая  $\delta = \pi, j = \delta, D = 0$ , а также для  $\delta = \pi, j = \delta, D = 0.25, D = 0.5, D = 0.75, D = 1$  представлены на рис. 2.2.6-2.2.10.

Рассматривая совместно результаты анализа и рис. 2.1, 2.2 отметим, что как для изотропных, так и для анизотропных сред круговые диаграммы могут служить цели определения направлений наибольшего и наименьшего пропускания, а также показателя степени проявления ЛААП. Наиболее значимо влияние ЛААП проявляется в изменении очертаний круговых диаграмм, рассчитанных для положения ВП преобразователей.

При отсутствии разности фазы  $\delta$  вдоль выбранного направления в образце и идеальном проявлении ЛААП круговая диаграмма в положении ВП должна быть близка функции  $A_{VP} = \cos j$ . По мере увеличения разности фазы  $\delta$  (от  $\delta = 0$  к  $\delta = \pi$ ) круговая диаграмма в положении ВП анизотропного образца становится более вытянутой вдоль направления НП, на ней появляются дополнительные минимумы. Наличие ЛААП

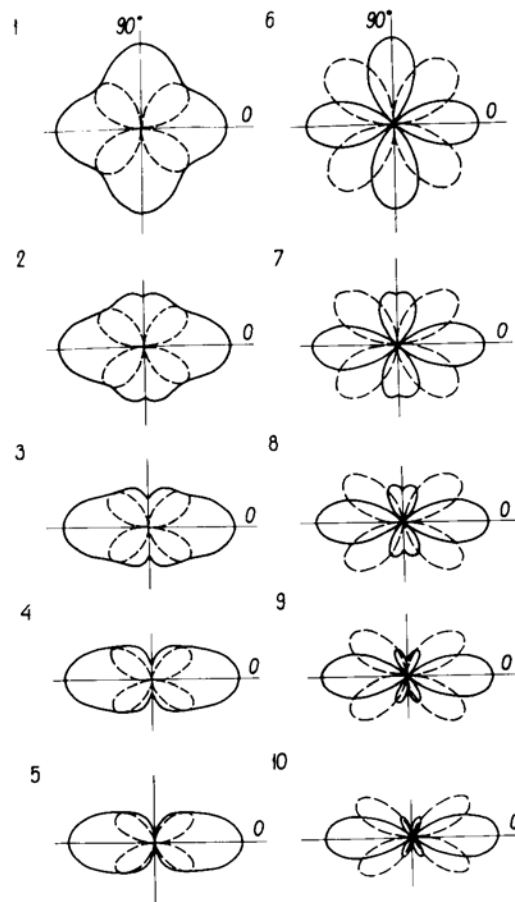


Рис.2.2. Круговые диаграммы изменения амплитуды сдвиговых колебаний, прошедших анизотропную среду при разной степени проявления эффекта линейной анизотропии поглощения. 1, 6 –  $D = 0$ ; 2, 7 –  $D = 0.25$ ; 3, 8 –  $D = 0.5$ ; 4, 9 –  $D = 0.75$ ; 5, 10 –  $D = 1.0$ . Для фигур 1-5 сдвиг фазы равен  $\delta = \pi/2$ , для 6 – 10  $\delta = \pi$ . Сплошная линия – векторы параллельны, пунктир – векторы скрещены.

приводит лишь к некоторому искажению очертания круговых диаграмм, рассчитанных для положения ВС, снижению площади и уменьшению размера ее лепестков. По мере увеличения показателя  $D$  круговая диаграмма ВП вытягивается вдоль направления НП.

#### 2.4. Наблюдения ЛААП на модельных средах

Для проверки сформулированных выше теоретических положений нами проведены модельные эксперименты по определению влияния линейных неоднородностей на амплитуду и величины скорости распространения продольных и сдвиговых колебаний. Измерения осуществлялись по методике акустополаризационных определений (Горбачевич, 1986). В качестве модели применяли цилиндрический образец, изготовленный из полиметилметакрилата (органического стекла), рис. 2.3<sup>1</sup>. Перед каждым циклом измерений в модели образовывались параллельные друг другу, перпендикулярные направлению прохождения пучка ультразвуковых колебаний отверстия диаметром 2 мм.

Измерения проводились при незаполненных (заполненных воздухом) и заполненных густым минеральным маслом отверстиях. В известной степени в первом случае модель отражала пористую среду со строго ориентированными, заполненными газом, а во втором - также ориентированными, но заполненными минеральным маслом, или иначе жидкими углеводородами, трещинами. Всего было выполнено 15 отдельных измерений, вначале в модели без отверстий, затем, последовательно, в модели с 1, 2, 3, 4, 5, 7 и 9 отверстиями. Для проведения измерений использовали стандартную ультразвуковую аппаратуру (Акустополаризационные..., 1985) и преобразователи чисто сдвиговых, линейно-поляризованных колебаний с собственной частотой  $f_0 = 0.47$  МГц. Основные результаты измерений представлены в таблице 2.1, акустополариграмма модели без отверстий - на рис. 2.3b, акустополариграммы модели с отверстиями заполненными и незаполненными, - на рис. 2.3c.

В таблице, в зависимости от количества отверстий, дана величина условной пористости  $n$ , вычисленная как отношение объема отверстий к объему модели, величины скорости распространения продольных колебаний  $V_p$ . Даны, соответственно, величины скорости распространения поперечных колебаний, замеренные при ориентировке вектора поляризации вдоль отверстий ( $V_{s1}$ ) и перпендикулярно к ним ( $V_{s2}$ ).

---

<sup>1</sup> Измерения на модели выполнены канд. геол.-мин. наук М.З.Абдрахимовым и инж. С.К.Беляевым.

Величина  $V_{s2}$  вычислена на основе учета сдвига фазы  $\delta$ , определяемой при акустополаризационных измерениях (Горбачевич, 1995). В таблице приводится отношение амплитуды волны продольных колебаний  $A_{pi}$ , прошедшей модель с отверстиями, к амплитуде  $A_{p0}$ , измеренной в модели без отверстий. Аналогично получено отношение  $A_{sim}/A_{s0}$  амплитуд поперечных колебаний, причем  $A_{sim}$  замерено при векторе поляризации преобразователей, находящемся в плоскости, проходящей через оси отверстий.

Табл. 2.1

Результаты измерений амплитуды и величин скорости распространения упругих колебаний в модели с разным числом отверстий.

К-во от-вер-стий	По-рис-то-сть $n$ , %	Отверстия заполнены газом						Отверстия заполнены маслом					
		$V_p$ , км/с	$V_{s1}$ , км/с	$V_{s2}$ , км/с	$A_{pi}/A_{p0}$	$A_{sim}/A_{s0}$	$D$	$V_p$ , км/с	$V_{s1}$ , км/с	$V_{s2}$ , км/с	$A_{pi}/A_{p0}$	$A_{sim}/A_{s0}$	$D$
0	0	2.75	1.38	1.380	1.0	1.0	0.00	2.75	1.38	1.380	1.0	1	0.0
1	1.27	2.75	1.38	1.380	0.81	0.69	-	2.75	1.38	1.375	0.81	0.69	0.27
2	2.54	2.75	1.38	1.379	0.45	0.56	0.030	2.75	1.38	1.378	0.45	0.60	-
3	3.81	2.75	1.38	1.377	0.45	0.45	0.064	2.75	1.38	1.374	0.45	0.40	0.31
4	4.72	2.75	1.38	1.374	0.45	0.35	0.088	2.75	1.38	1.365	0.45	0.35	0.44
5	5.63	2.73	1.38	1.374	0.38	0.39	0.091	2.73	1.38	-	0.38	0.38	0.53
7	7.45	2.71	1.38	1.369	0.25	0.34	0.106	2.71	1.38	1.358	0.25	0.33	0.65
9	9.27	2.71	1.38	1.361	0.25	0.24	-	2.71	1.38	-	0.25	0.28	-

Величина линейной анизотропии поглощения измерена по формуле (2.3), характеризующей различное поглощение сдвиговых колебаний при различной ориентации вектора поляризации относительно структуры среды (в данном случае - осей отверстий). На рис. 2.4 показана зависимость величины  $D$  в модели с незаполненными отверстиями и заполненными маслом, отношения амплитуд  $A_{sim}/A_{s0}$  от числа отверстий в модели.

Как следует из результатов испытаний, рис. 2.3, акустополариграмма, полученная при параллельных векторах поляризации преобразователей на модели без отверстий, представляет собой, кривую, не отличающуюся от окружности. Это свидетельствует о том, что исходный материал модели упруго изотропен (Горбачевич, 1986).

Для модели с отверстиями, заполненными воздухом, по мере возрастания числа отверстий или показателя условной пористости  $n$  (табл. 2.1, рис. 2.4) заметно относительно небольшое увеличение упругой



анизотропии. Если судить по акустополяриграммам ВС, отчетливая анизотропия заметна при 5-7 отверстиях в модели. При таком числе отверстий наблюдается небольшое снижение (0.8-1.5%) скорости распространения продольных колебаний  $V_p$  и сдвиговых,  $V_{s2}$ , с ориентацией вектора поляризации по нормали к отверстиям. По мере увеличения числа отверстий на пути пучка лучей амплитуда как продольных  $A_{pi}/A_{p0}$ , так и сдвиговых  $A_{sim}/A_{s0}$  колебаний существенно убывает.

Например, на 9 отверстиях как продольные, так и сдвиговые колебания ослабляются примерно в 4 раза. Причем, степень этого ослабления не зависит, рис. 2.3а, от того, заполнены ли отверстия или не заполнены. Совсем другое положение наблюдается при анализе изменений амплитуды сдвиговых колебаний с вектором поляризации, ориентированном по нормали к оси отверстия. Наиболее наглядно это показано рис. на 2.3.4б-2.3.6б. Например, акустополяриграмма, полученная на модели с пятью заполненными отверстиями, рис. 2.3.5а, подобна теоретической круговой диаграмме, рис. 2.2.3 при  $D = 0.5$ ,  $\delta = \pi/2$ .

При увеличении в модели числа заполненных маслом отверстий акустополяриграмма ВП уплощается, в значительной степени возрастает показатель  $D$ , см. рис. 2.4. Если судить по наклону усредненных прямых, из рисунка следует, что показатель  $D$  для случая заполненных отверстий в 6 раз выше, чем для незаполненных. Это

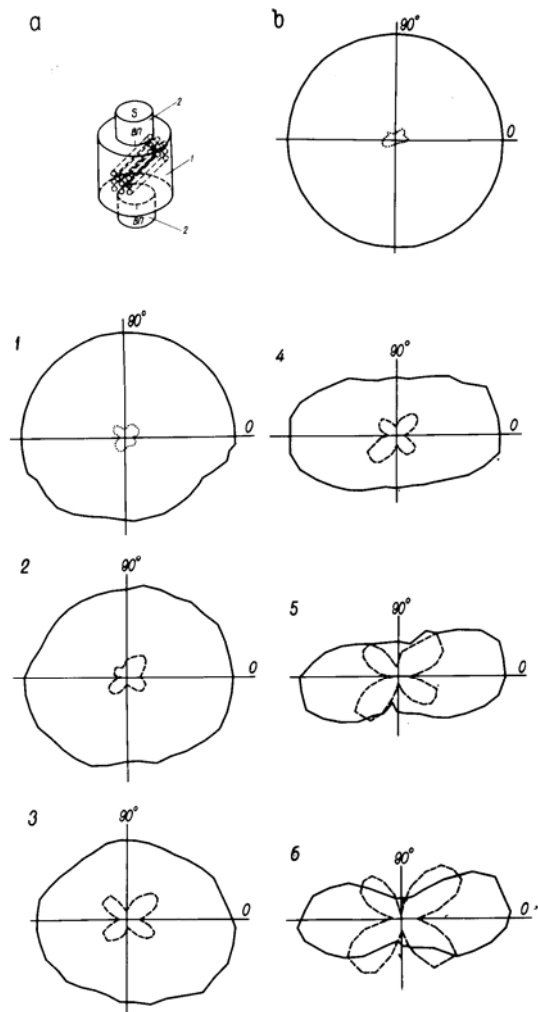


Рис.2.3. Модель и акустополяриграммы модели с ориентированными отверстиями.

а – модель, б – акустополяриграммы модели без отверстий и с отверстиями: 1, 2, 3 – соответственно 3, 5, 7 отверстий, заполнитель – воздух, 4, 5, 6 – соответственно, 3, 5, 7 отверстий, заполнитель – минеральное масло. Сплошная линия – векторы параллельны, пунктир – векторы скрещены.

происходит потому, что при прохождении сдвиговых колебаний с вектором смещения, направленном по нормали к отверстиям, большая часть энергии колебаний не отражается на границе отверстий, а проходит в жидкость и там рассеивается. Этот вывод следует из того, что скорость распространения ультразвука в минеральном масле ( $V_p = 1.44$  км/с) близка к скорости распространения сдвиговых волн в материале модели ( $V_s = 1.38$  км/с) при сравнительно небольшом отличии плотности масла ( $\rho = 0.87$  г/см<sup>3</sup>) и полиметилметакрилата ( $\rho = 1.18$  г/см<sup>3</sup>). Если же отверстия (или поры) незаполнены, то упругая энергия не преодолевает границу среда-газ и, следовательно, не теряется. В этом случае, благодаря явлению дифракции, волна сдвиговых колебаний огибает отверстия.

На основе изложенных модельных экспериментов можно сделать следующие заключения.

Эффект линейной акустической анизотропии поглощения возникает в средах при взаимодействии линейно-поляризованных сдвиговых колебаний с ориентированными вдоль линии или плоскости неоднородностями. Это могут быть ориентированные трещины, как заполненные, например, жидкостью, так и не заполненные. Степень проявления ЛААП существенно зависит от того, заполнены ли трещины жидкостью или они сухие. Заполнение трещин, например, жидкими углеводородами может существенно увеличивать показатель линейной анизотропии поглощения  $D$ .

В целом, эффект линейной анизотропии поглощения можно представить двумя основными моделями. Одной из них является рассмотренная выше модель Т.М.Проктора (Proctor, 1971) или модель I. В горных породах такая модель может быть реализована в средах, содержащих ориентированные трещины или плоскостные элементы (минералы) такие как слюда, тальк и др. На образце из среды, представляющей

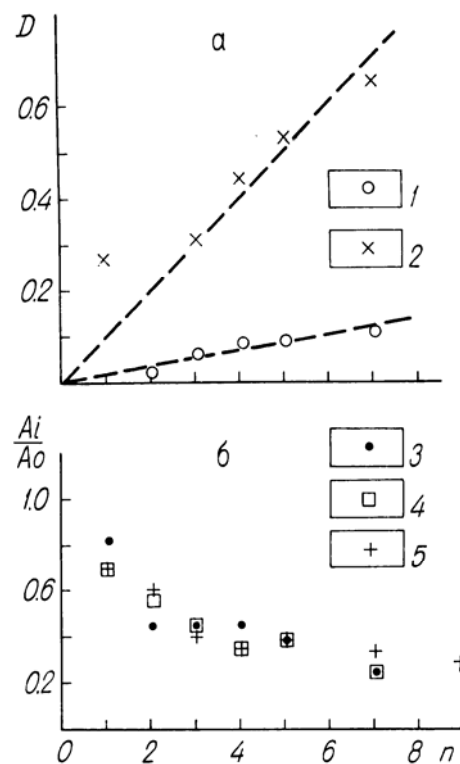


Рис.2.4. Показатель линейной анизотропии поглощения  $D$ , измеренный в модели с незаполненными отверстиями (1) и заполненными (2), отношение  $A_{pi}/A_{po}$  (3), отношение  $A_{sim}/A_{so}$  в модели с незаполненными отверстиями (4) и заполненными (5), в зависимости от числа отверстий в модели.

модель I, будет наблюдаться наличие ЛААП на тех гранях, куда выходят торцы плоскостных элементов, рис. 2.5а. Причем, направления “наибольшего пропускания” и, соответственно, наибольшие диаметры акустополяриграмм ВП на соседних гранях будут направлены друг на друга и укажут пространственное положение плоскостных элементов. На грани, параллельной плоскостным элементам, будут зарегистрированы акустополяриграммы ВП, близкие к изометрическим. Результаты наблюдений, рис. 2.3, позволяют сделать вывод, что существует иная, принципиально отличная от первой, модель II. Она состоит из линейных, вытянутых в одном направлении, изометричных в поперечном сечении элементов, рис. 2.5б.

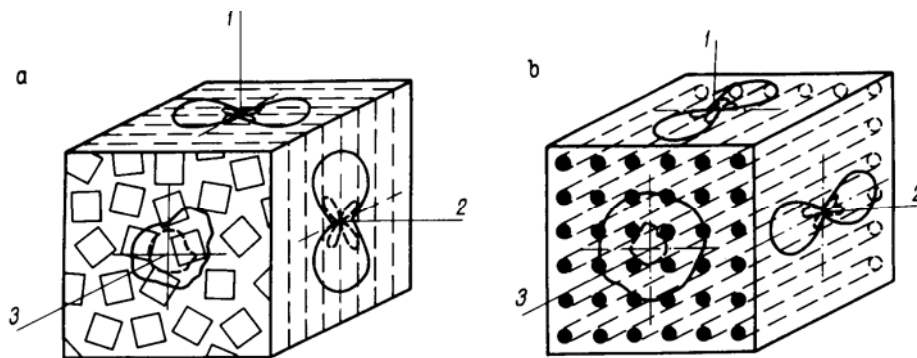


Рис.2.5. Плоскостная (а) и линейная (б) модели проявления ЛААП. Акустополяриграммы получены в направлениях 1-1', 2-2', 3-3'. Сплошная линия – векторы параллельны, пунктир – векторы скрещены.

Как следует из рисунка, на образце, представляющем среду модели II, в наибольшей степени эффект ЛААП будет проявляться на гранях, образованных параллельно линейным элементам. В отличие от модели I, направления “наибольшего пропускания”, и, соответственно, наибольшие диаметры акустополяриграмм ВП будут направлены на грань, перпендикулярную линейным элементам. На этой грани должна быть получена акустополяриграмма ВП, близкая к изометрической. Как следует из схем, рис. 2.5а, 2.5б, отличие среды по модели I от модели II могут быть установлены только на основе системы пространственных измерений.

## 2.5. Наблюдения ЛААП на модели с угловым несогласием с элементами упругой симметрии

Пространственное положение элементов симметрии упругой анизотропии и линейной акустической анизотропии поглощения в

твердых телах может и не совпадать, так как эти явления имеют разную физическую природу.

При угловом несогласии элементов симметрии ЛААП и упругой анизотропии формулы (2.6) и (2.7) приобретают следующий вид:

$$A_{VPM} = A_S A_R (A_{RN} \cos(j + \tau) + A_{RR}) \sqrt{\cos^4 \beta + \cos^2 \beta \sin^2 \beta \cos \delta + \sin^4 \beta}, \quad (2.12)$$

$$A_{VCM} = A_S A_R (A_{RN} \cos(j + \tau) + A_{RR}) \sin 2\beta \sin \frac{\delta}{2}, \quad (2.13)$$

где  $\tau$  - угол между элементом упругой симметрии среды и элементом симметрии пространственной фигуры ЛААП твердого тела.

Нами, по формулам (2.12), (2.13), выполнены расчеты круговых диаграмм амплитуд  $A_{VPM}$  и  $A_{VCM}$  при двух значениях величины сдвига фазы  $\delta = \pi/2$ ,  $\delta = \pi$  и разных углах несогласия  $\tau$ . Результаты расчетов приведены на рис.2.6.

Как следует из диаграмм, при наличии углового несогласия  $0 < \tau < 45^\circ$  диаграммы  $A_{VPM}$  как при  $\delta = \pi/2$ , так и при  $\delta = \pi$  становятся ассиметричными. Эти диаграммы становятся симметричными при  $\tau = 0, 45^\circ + n\pi/4$ , где  $n = 0, 1, 2, 3 \dots$ . Подобная особенность диаграмм ВП может служить диагностическим признаком наличия углового несогласия между элементом упругой симметрии среды и элементом симметрии пространственной фигуры ЛААП твердого тела. При наличии такого несогласия еще более заметны изменения диаграмм  $A_{VCM}$ , полученных при скрещенных векторах поляризации. Лепестки этих диаграмм становятся неравными по величине и площади, а при  $\tau = 45^\circ$  четырехлепестковая фигура становится двухлепестковой. При величине сдвига фазы  $\delta = \pi$  и  $65^\circ > \tau > 25^\circ$  наблюдается любопытное явление - в определенном диапазоне углов амплитуда при

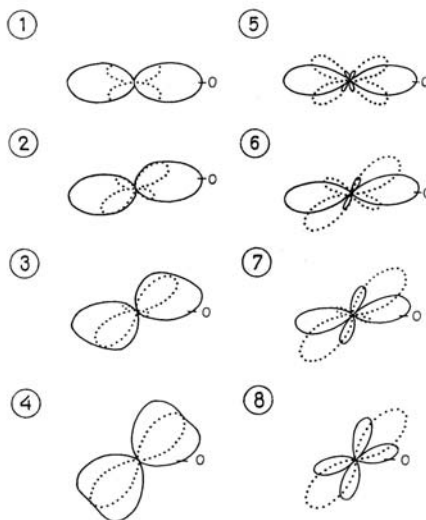


Рис.2.6. Круговые диаграммы амплитуд  $A_{VPM}$  и при двух значениях величины сдвига фазы  $\delta = \pi/2$  (1-4),  $\delta = \pi$  (5-8) и разных углах несогласия  $\tau = 0^\circ$  (1, 5),  $15^\circ$  (2, 6),  $30^\circ$  (3, 7),  $45^\circ$  (4, 8). Отсчет углов производится от элемента упругой симметрии среды, элемент симметрии ЛААП смещается на угол  $\tau$ . Положение ВП - сплошная линия, ВС - пунктир.

скрещенных векторах поляризации становится больше, чем при параллельных ( $A_{VCM} > A_{VPM}$ ). Данные признаки являются определяющими при диагностике углового несогласия между элементами упругой симметрии среды и симметрии пространственной фигуры линейной анизотропии поглощения твердого тела.

Помимо расчетов, нами выполнены модельные измерения взаимного влияния указанных эффектов на форму акустополаризационных диаграмм (Горбачевич, Ильченко, 1997). Модель, подготовленная для измерений, была составлена из двух пластин (рис.2.7). Одна из пластин была выполнена из пьезоэлектрической керамики типа ЦТС-19. Материал этой пластины представляет собой анизотропную среду поперечно-изотропного типа симметрии. Пластина была выпилена таким образом, чтобы ее поверхности были параллельны оси упругой симметрии керамики. Ее толщина составляла 4.25 мм. В качестве материала для второй пластины взято дерево с правильной слоистостью, поскольку оно обладает ярко выраженной линейной акустической анизотропией поглощения (Gorbatsevich, 1999). Деревянная пластина толщиной 2.25 мм выпилена таким образом, что направление волокон совпадает с ее осью симметрии по удлинению. Акустополариграммы керамической и деревянной пластин представлены на рис. 2.7. Измерения выполнялись на основной частоте  $f_o = 1.12$  МГц. Сдвиг фазы вдоль оси и плоскости симметрии в керамической пластине составлял  $88^\circ$ , а в пластине из дерева -  $56^\circ$ .

Перед измерениями на модели, положение пластин относительно друг друга жестко фиксировалось при помощи специального зажима. Затем скрепленные пластины помещали на поворотную платформу акустополарископа (Горбачевич, 1995). Акустический контакт между пластинами осуществлялся при помощи высоковязкого раствора некристаллизующихся полисахаридов (Акустополаризационные..., 1985). В процессе акустополарископии измеряли амплитуду импульса проходящих колебаний в пределах угла поворота  $0-360^\circ$  с шагом  $10^\circ$ . Измерения амплитуды проводились как при скрещенных (BC), так и при параллельных (BP) векторах поляризации. В процессе измерений последовательно изменяли взаимную ориентировку пластин модели. Вначале угол между пластинами модели был равен  $0^\circ$ . Затем угол между осями пластин был изменен на  $15^\circ$ . Следом взаимный угол был увеличен еще на  $15^\circ$ . Таким образом, была выполнена серия акустополаризационных измерений с углами между элементами симметрии модели, равными 0, 15, 30, 45, 60, 75 и  $90^\circ$ .

По акустополярнограмме ВП определяли степень проявления ЛААП ( $D$ ), а по акустополярнограммам ВП и ВС - углы  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$ . Причем угол  $\alpha_1$  определяли между осью координат  $0^\circ$  и прямой, проведенной через ось вращения модели и противостоящие максимумы амплитуд акустополярнограммы ВП (вершины лепестков большей по размерам пары). Углы  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  определяли между осью координат  $0^\circ$  и прямыми, проведенными через противоположные минимумы акустополярнограммы ВС. При каждом этапе измерений также фиксировали изменения размеров и формы лепестков акустополярнограмм. Результаты измерений представлены на рис.2.7 и в табл.2.2\*).

Для случая, когда угол  $\tau$  между элементами упругой симметрии пластин равен  $0^\circ$ , рис.2.7а, суммарная акустополярнограмма представляет собой комбинацию акустополярнограмм рис. 2.7.2 и 2.7.3, а модель представляет поперечно-изотропную среду со значительным проявлением ЛААП. Оценка его степени по формуле (2.3) дает величину  $D = 0,53$ , величины углов  $\alpha_1 = 0^\circ$ ,  $\alpha_2 = 0^\circ$ ,  $\alpha_3 = 90^\circ$ , табл.2.2.

При углах поворота пластин относительно друг друга на угол  $\tau = 15^\circ$  степень проявления ЛААП возрастает до  $D = 0,58$  (рис.2.7б).

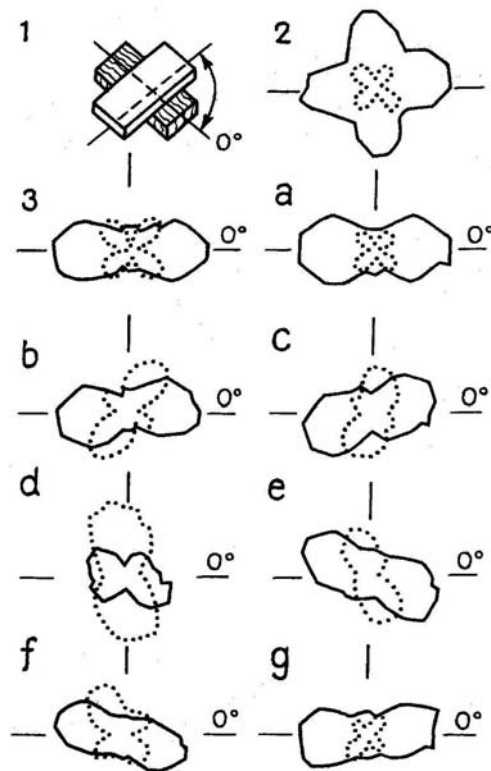


Рис. 2.7. Схема модели и акустополярнограммы, полученные при различных углах между элементами симметрии керамической и деревянной пластин.

1 - схема модели: сверху расположена керамическая пластинка, снизу - пластина из дерева; 2 - акустополярнограмма керамической пластины; 3 - акустополярнограмма пластины из дерева. Акустополярнограммы модели с углами  $\tau$  между элементами симметрии пластин, соответственно: а -  $0^\circ$ , б -  $15^\circ$ , с -  $30^\circ$ , д -  $45^\circ$ , е -  $60^\circ$ , ф -  $75^\circ$ , г -  $90^\circ$ . Отсчет углов производится от элемента симметрии ЛААП деревянной пластины, элемент упругой симметрии керамической пластины смещается на угол  $\tau$ . Положение ВП - сплошная линия, ВС - пунктир.

\*) Измерения на модели выполнены канд. геол.-мин. наук В.Л. Ильченко

Лепестки акустополяриграммы ВС приобретают асимметричность. Например, лепестки, расположенные в I-III четвертях окружности, стали почти в два раза больше и шире, а те, что находятся во II-IV четвертях удлинились сравнительно незначительно, примерно на 10%. Акустополяриграмма ВП, если судить по углу  $\alpha_1$ , повернулась относительно оси координат приблизительно на  $10^0$ . Углы, отмечающие положение элементов упругой симметрии, равны  $\alpha_2 = 0^0$ ,  $\alpha_3 = 114^0$ .

Табл.2.2

Результаты измерения углов на акустополяриграммах модели, составленной из керамической и деревянной пластин.

№. П/П	Углы между элементами симметрии пластин модели $\tau$ , град	Углы поворота элементов симметрии акустополяриграмм		Степень проявления ЛААП $D$
		$\alpha_1$ , град	$\alpha_2$ , град.	
1	0	0	90	0.53
2	15	10	114	0.58
3	30	15	130	0.37
4	45	0	0	0.52
5	60	160	65	0.49
6	75	165	78	0.53
7	90	0	90	0.49

Примечание: угол  $\alpha_2 = 0$  для всех значений углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_3$ .

При повороте на угол  $\tau = 30^0$  показатель ЛААП изменился до величины  $D = 0,37$  (рис.2.7с). Углы поворота элементов симметрии акустополяриграмм составили  $\alpha_1 = 15^0$ ,  $\alpha_2 = 0^0$ ,  $\alpha_3 = 130^0$ . При повороте на угол  $\tau = 45^0$  степень проявления ЛААП увеличилась до  $D = 0,52$  (рис.2.7d). Акустополяриграммы как ВП, так и ВС приняли форму, близкую к двулепестковой. В этом случае имелась возможность измерить только два угла  $\alpha_1 = 0^0$  и  $\alpha_2 = 0^0$ . Наблюдается значительное увеличение амплитуды волн, зарегистрированных в положении ВС. Эта амплитуда заметно превышает, в данном случае, амплитуду волн, зарегистрированных в положении ВП.

Наблюдения, выполненные при углах  $\tau > 45^0$ , показывают, что результирующие акустополяриграммы являются зеркальным отображением предыдущих. Имеющиеся расхождения между акустополяриграммами, полученными при  $\tau = 15^0$  и  $\tau = 75^0$ ,  $\tau = 30^0$  и  $\tau = 60^0$ , вызваны, по-видимому, неточностями установки угла между пластинами модели, нестабильностью контактных условий. Акустополяриграммы модели при  $\tau = 90^0$ , в целом, повторяют очертания акустополяриграммы при  $\tau = 0^0$ , при близких характеристиках  $D$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ .

В целом, анализируя данные рис.2.7 и табл.2.2, следует отметить, что при увеличении угла между пластинами модели происходит некоторый поворот оси симметрии акустополяриграммы (ее наибольшего диаметра), полученной в положении ВП. От  $\tau = 0$  до  $\tau = 45^0$  этот поворот происходит в том же направлении, что и поворот одной из пластин модели. Однако, при  $\tau > 45^0$  такой поворот происходит в обратную сторону. При изменении угла  $\tau$  степень проявления ЛААП изменяется не слишком значительно. Элемент упругой симметрии, выделяемый на акустополяриграммах ВС и отвечающий элементу симметрии для пластины из дерева, судя по постоянной величине угла  $\alpha_2 = 0^0$ , остается неизменным. Это легко объясняется тем, что в процессе измерений свое положение изменяла керамическая пластина, а пластина из дерева оставалась на месте относительно отсчетной шкалы акустополярископа. Второй элемент упругой симметрии, отвечающий положению элемента симметрии керамической пластины, отражается адекватно на акустополяриграмме ВС лишь при малых углах поворота  $\tau$ . При углах  $\tau \sim 20^0$  и более истинное положение элементов симметрии керамической пластины не может быть определено по минимумам диаграмм ВС. Подобный аспект следует учитывать при наличии углового несогласия элементов симметрии ЛААП и упругой анизотропии.

Таким образом, как по теоретическим расчетам, так и по результатам модельных испытаний выявлено, что наиболее характерным признаком наличия углового расхождения между элементами симметрии ЛААП и упругой анизотропии является неравенство размеров и площади лепестков акустополяриграммы ВС. При этом, наибольший диаметр акустополяриграммы ВС может быть больше, чем ВП.

Теоретический анализ и наблюдения совместного проявления упругой анизотропии и эффекта ЛААП на модельных средах позволяют сделать следующие выводы:

1. Акустополяриграммы образцов среды, проявляющей эффект линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП), позволяют определить направления наибольшего и наименьшего "пропускания" сдвиговых колебаний, а также показатель степени проявления ЛААП.



2. Влияние эффекта линейной акустической анизотропии поглощения проявляется наиболее значимо в изменении конфигурации акустополяриграмм, полученных в положении ВП излучателя и приемника. По мере увеличения разности фазы в пределах  $0-\pi$  акустополяриграмма ВП анизотропного образца становится более вытянутой, на ней появляются дополнительные минимумы.

3. Эффект ЛААП приводит лишь к некоторому искажению конфигурации акустополяриграмм, полученных в положении ВС.

4. Выделены два основных типа проявления ЛААП, плоскостной и линейный. При плоскостном типе ЛААП наибольшие диаметры акустополяриграмм, ориентированы на разноименные грани кубического образца. Наибольшие диаметры акустополяриграмм при линейном типе ЛААП ориентированы на одну и ту же грань.

5. Пространственная направленность элементов упругой симметрии и структурных элементов, обуславливающих проявление эффекта ЛААП, может не совпадать. При их совпадении наблюдается равенство формы и размера лепестков акустополяриграмм, полученных при скрещенных векторах поляризации.

6. Наиболее характерным признаком наличия углового расхождения между элементами симметрии ЛААП и упругой анизотропии является неравенство размеров и площади лепестков акустополяриграммы ВС. При этом, наибольший диаметр (максимальная амплитуда) акустополяриграммы ВС может быть больше, чем диаметр акустополяриграммы ВП.

### 3. ЯВЛЕНИЕ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ СДВИГОВЫХ ВОЛН В АНИЗОТРОПНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕДАХ

Как было показано выше, эффект линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП) проявляется в средах, содержащих плоскостные или линейные элементы. Однако имеется и другой эффект, проявляющийся при распространении сейсмических волн через геологические среды. Его проявление сопровождается изменением степени поляризации цугов сдвиговых колебаний. Подобное изменение, как правило, сопровождается увеличением эллиптичности сдвиговых волн или деполяризацией. В работе С.И.Александрова явление деполяризации объясняется рассеянием сдвиговых волн на мелко- и крупномасштабных неоднородностях (Александров, 1997). Эти выводы подтверждены экспериментальными наблюдениями на неоднородных трещиноватых средах, выполненных С.Крэмпиным (Crampin, 1985). Иную трактовку явления деполяризации сдвиговых волн дает И.Р.Оболенцева (Оболенцева, 1992). Согласно развиваемой ею теории, деполяризация возникает за счет гиротропии или акустической активности некоторых твердых сред. При распространении сдвиговых волн в таких средах происходит поворот вектора их поляризации, пропорциональный длине пройденного пути.

По нашему мнению, эффект деполяризации в значительной степени проявляется и при распространении сдвиговой волну через среды, состоящие, например, из разнориентированных упругоанизотропных слоев. Рассмотрим некоторые теоретические аспекты, результаты моделирования и определения на образцах кристаллических горных пород эффекта деполяризации сдвиговых волн (ДСВ).

#### 3.1. Теоретические аспекты явления деполяризации сдвиговых волн

Рассмотрим задачу о распространении и регистрации сдвиговых волн через поперечно-изотропную среду, состоящую из двух, I и II частей, рис.3.1.

Длина частей в направлении распространения колебаний равна  $x_1$  и  $x_2$ . В первой части ось симметрии среды располагается в направлении  $[100]$ , а плоскость проходит через направления  $[010]$ - $[010']$ . Во второй части ось симметрии проходит в направлении  $[100'']$ , а плоскость - через  $[010'']$ - $[010''']$ . Ось и плоскость второй части повернуты относительно первой на угол  $\alpha$ . Обе части соприкасаются (с соблюдением акустического контакта) по плоскостям  $[100']$ - $[010']$  и  $[100'']$ - $[010'']$ .

На плоскости  $[100]$ - $[010]$  первой части в направлении ОК под углом  $\beta$  к направлению  $[010]$  приложено линейно-поляризованное сдвиговое гармоническое колебание  $A_S = A \sin(\omega t + \varphi_0)$ . Вектор  $A_S$  в направлении оси

[100] создает компоненту  $B = A \sin \beta \sin(\omega t + \varphi_0)$ , а в направлении [010] - компоненту  $C = A \cos \beta \sin(\omega t + \varphi_0)$ .

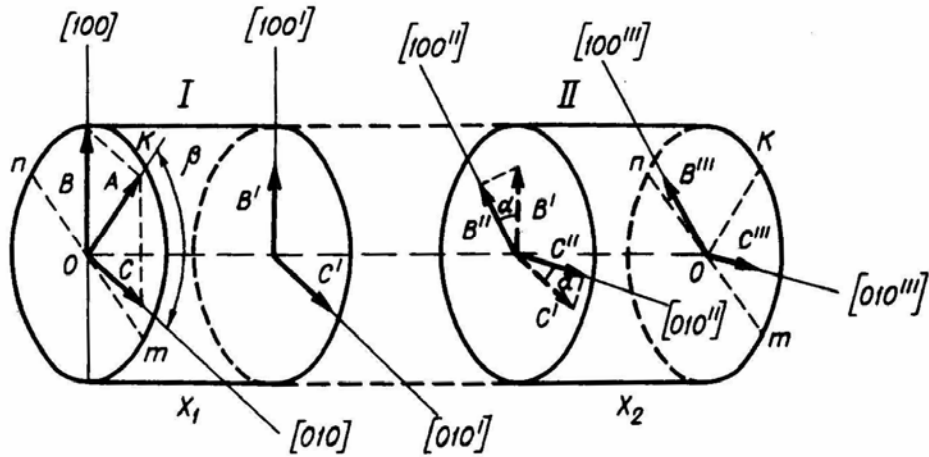


Рис.3.1. Схема регистрации амплитуды сдвиговой волны, проходящей через части I и II образца. Элементы упругой симметрии частей повернуты друг относительно друга на угол  $\alpha$ .

При распространении сдвиговых колебаний в первой части на расстояние  $x_1$  компонента  $B$  вдоль направления [100'] станет равна (Горбачевич, 1982):

$$B' = A \sin \beta \sin(\omega t - 2\pi x_1 / \lambda_{11} + \varphi_0), \quad (3.1)$$

а вдоль направления [010']

$$C' = A \cos \beta \sin(\omega t - 2\pi x_1 / \lambda_{12} + \varphi_0), \quad (3.2)$$

где  $\lambda_{11}$ ,  $\lambda_{12}$  - длина волны с вектором поляризации, лежащим в направлении оси и в плоскости симметрии, соответственно.

На акустическом контакте первой и второй частей векторы  $B'$  и  $C'$  создадут смещения вдоль направления [100'']:

$$B'' = A \cdot (Z_{BB} \cos \alpha \sin \beta \sin r_{11} - Z_{CB} \sin \alpha \cos \beta \sin r_{12}), \quad (3.3)$$

а вдоль направления [010''']

$$C'' = A \cdot (Z_{BC} \sin \alpha \sin \beta \sin r_{11} + Z_{CC} \cos \alpha \cos \beta \sin r_{12}), \quad (3.4)$$

где  $Z_{BB}$ ,  $Z_{CB}$ ,  $Z_{BC}$  и  $Z_{CC}$  - некоторые коэффициенты прохождения сдвиговых волн, зависящие от соотношения величин скорости распространения колебания на контакте вдоль направлений  $B'$ ,  $C'$ ,  $B''$  и  $C''$ , а также величин плотности частей  $\rho_1$  и  $\rho_2$ ;  $r_{11} = \omega t - 2\pi x_1 / \lambda_{11} + \varphi_0$ ,  $r_{12} = \omega t - 2\pi x_1 / \lambda_{12} + \varphi_0$ .

При распространении колебаний во второй части на расстояние  $x_2$  компоненты  $B''$  и  $C''$  приобретут новые значения. Компонента смещения вдоль оси  $[100''']$  будет равна:

$$B''' = A \cdot [Z_{BB} \cos \alpha \sin \beta \sin(\omega t - 2\pi x_1 / \lambda_{11} - 2\pi x_2 / \lambda_{21} + \varphi_0) - Z_{BC} \sin \alpha \cos \beta \sin(\omega t - 2\pi x_1 / \lambda_{12} - 2\pi x_2 / \lambda_{22} + \varphi_0)] \quad (3.5)$$

а вдоль направления  $[010''']$

$$C''' = A \cdot [Z_{BC} \sin \alpha \sin \beta \sin(\omega t - 2\pi x_1 / \lambda_{11} - 2\pi x_2 / \lambda_{21} + \varphi_0) + Z_{CC} \cos \alpha \cos \beta \sin(\omega t - 2\pi x_1 / \lambda_{12} - 2\pi x_2 / \lambda_{22} + \varphi_0)] \quad (3.6)$$

где  $\lambda_{21}$ ,  $\lambda_{22}$  - длина волны с вектором поляризации, лежащим в направлении оси  $[100'']-[100''']$  и плоскости симметрии  $[010'']-[010''']$ , соответственно.

Представим, что в контакте с плоскостью  $[100'']-[010''']$  находится приемник колебаний, направление наибольшей чувствительности  $A_n$  которого параллельно направлению ОК - вектору смещения среды на плоскости излучателя (положение "векторы параллельны" - ВП). В этом случае амплитуда, создаваемая в приемнике, учитывая уравнения (3.1)-(3.6), будет равна:

$$A_{VP} = AA_n [\sin(\beta - \alpha)(Z_{BB} \cos \alpha \sin \beta \sin r_{1121} - Z_{CB} \sin \alpha \cos \beta \sin r_{1222}) + \cos(\beta - \alpha)(Z_{BC} \sin \alpha \sin \beta \sin r_{1121} + Z_{CC} \cos \alpha \cos \beta \sin r_{1222})] \quad (3.7)$$

Для случая, когда направление наибольшей чувствительности приемника будет проходить в направлении n-m, совпадающем с нормалью к направлению ОК (положение "векторы скрещены" - ВС),

$$A_{VC} = AA_n [\cos(\beta - \alpha)(Z_{BB} \cos \alpha \sin \beta \sin r_{1121} - Z_{CB} \sin \alpha \cos \beta \sin r_{1222}) - \sin(\beta - \alpha)(Z_{BC} \sin \alpha \sin \beta \sin r_{1121} + Z_{CC} \cos \alpha \cos \beta \sin r_{1222})] \quad (3.8)$$

где  $r_{1121} = \omega t - 2\pi x_1 / \lambda_{11} - 2\pi x_2 / \lambda_{21} + \varphi_0$ ,

$r_{1222} = \omega t - 2\pi x_1 / \lambda_{12} - 2\pi x_2 / \lambda_{22} + \varphi_0$ .

Амплитуды  $A_{VP}$ , как и  $A_{VC}$  будут зависеть от соотношения длин волн  $\lambda_{11}$ ,  $\lambda_{12}$ ,  $\lambda_{21}$ ,  $\lambda_{22}$  в каждой части выбранной среды, их длины  $x_1$ ,  $x_2$ , плотности  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ , индикатриссы скорости распространения колебаний, их частоты, величины углов  $\alpha$ ,  $\beta$ .

Формулы (3.7) и (3.8), с учетом большого числа переменных, довольно сложны для непосредственного анализа. Поэтому рассмотрим случай, когда составной образец, рис. 3.1, состоит из двух частей одинаковой длины, выполненных из одинакового материала. Их элементы упругой симметрии расположены так, как это показано на рис. 3.1. Таким образом, для составного образца  $x_1 = x_2 = x$ ;  $\lambda_{11} = \lambda_{21} = \lambda_1$ ;  $\lambda_{12} = \lambda_{22} = \lambda_2$ ;  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ . Допуская, что анизотропия скорости распространения сдвиговых колебаний относится к категории слабой, при  $\rho_1 = \rho_2$  можно принять, что величины коэффициентов прохождения  $Z_{BB} \approx Z_{CB} \approx Z_{BC} \approx Z_{CC} \approx 1$ , т.е. примерно равны единице. Тогда для амплитуд  $A_{VP}$  и  $A_{VC}$  получим следующие выражения:

$$A_{VP} = AA_n [\sin(\beta - \alpha)(\cos \alpha \sin \beta \sin r_{1111} - \sin \alpha \cos \beta \sin r_{2222}) + \cos(\beta - \alpha)(\sin \alpha \sin \beta \sin r_{1111} + \cos \alpha \cos \beta \sin r_{2222})] \quad (3.9)$$

$$A_{VC} = AA_n [\cos(\beta - \alpha)(\cos \alpha \sin \beta \sin r_{1111} - \sin \alpha \cos \beta \sin r_{2222}) - \sin(\beta - \alpha)(\sin \alpha \sin \beta \sin r_{1111} + \cos \alpha \cos \beta \sin r_{2222})] \quad (3.10)$$

где  $r_{1111} = \omega t - 4\pi x / \lambda_1 + \varphi_0$ ,  $r_{2222} = \omega t - 4\pi x / \lambda_2 + \varphi_0$ .

Анализ последних формул (3.9), (3.10) позволяет объяснить особенности процессов распространения сдвиговых колебаний через среды, состоящие из, например, слоев одинаковой толщины с одинаковыми свойствами, в которых, однако, элементы упругой симметрии разориентированы друг относительно друга. Ниже будет рассмотрен частный случай такого анализа, путем измерения амплитуды сдвиговых колебаний, проходящих через модель, составленную из двух одинаковых анизотропных пластин.

### 3.2. Моделирование процесса распространения сдвиговых волн через анизотропные пластины

Измерения амплитуд сдвиговых колебаний, проходящих через модель, состоящую из двух анизотропных пластин, выполнены методом акустополярископии (Горбачевич, 1995). Анизотропные пластины одинаковой толщины были изготовлены из упругоанизотропной керамики ЦТС-19 (Горбачевич, 1998). Их толщина составляет 4.2 мм, а плоскость упругой симметрии перпендикулярна плоскости пластин. Скорость распространения продольных колебаний в пластинах равна  $V_p =$

3.51 км/с, а сдвиговых, при векторе поляризации, перпендикулярном плоскости симметрии -  $V_{s\perp} = 1.72$  км/с, параллельном плоскости -  $V_{s\parallel} = 1.89$  км/с. Измерения выполнялись на частоте  $f_0 = 1.12$  МГц. При этом, длина волны сдвиговых колебаний вдоль плоскости симметрии пластины составляла  $\lambda_1 = 1.54$  мм, вдоль оси -  $\lambda_2 = 1.69$  мм. Разница фазы при распространении импульсов сдвиговых колебаний по нормали к плоскости симметрии и параллельно ей на толщину одной пластины составила величину  $\delta = 88.4^\circ$ .

В процессе измерений пластины были наложены друг на друга и помещены на столик акустополярископа (Авт. свид. 1281993) между излучателем и приемником линейно-поляризованных чисто сдвиговых ультразвуковых колебаний таким образом, чтобы цилиндрический пучок лучей проходил через обе из них. Положение элементов симметрии пластин закреплялось зажимом друг относительно друга (см. рис.3.2.А).

Первое измерение  $A_{VP}$  и  $A_{VC}$  было выполнено при величине угла между элементами симметрии пластин  $\alpha = 0$ . Полученные акустополяриграммы ВП (векторы поляризации параллельны) и ВС (векторы скрещены) приведены на рис.3.2В ( $\alpha = 0$ ). Затем угол между элементами симметрии пластин был установлен равным  $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ . Соответствующие акустополяриграммы приведены на рис.3.2В.

Диаграммы ВП позволяют заметить постепенный переход, по мере возрастания угла  $\alpha$ , от четырехлепестковой фигуры к фигуре, все более похожей на окружность. Диаграмма, зарегистрированная при  $\alpha = 90^\circ$ , довольно близка к диаграмме изотропной среды, см. рис.1.4. Диаграммы ВС, по мере

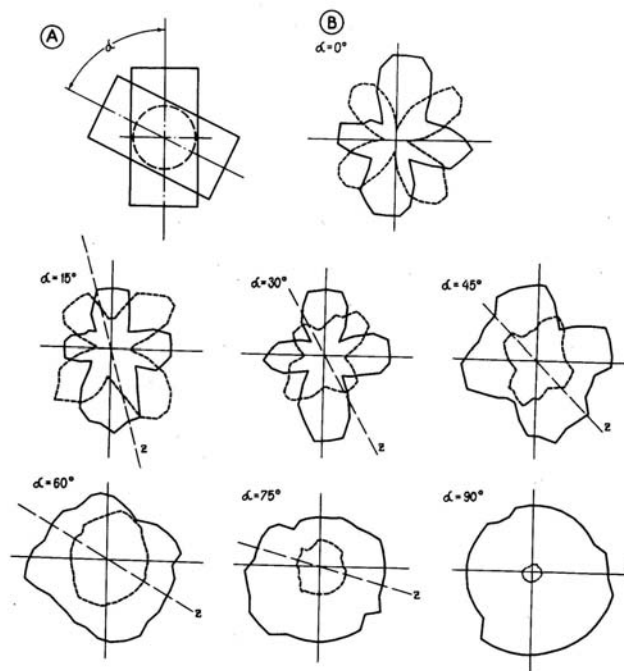


Рис.3.2. Взаимное положение пластин на столике акустополярископа (А), акустополяриграммы, полученные при разных углах  $\alpha$  между элементами упругой симметрии пластин (В). Сплошная линия - векторы параллельны, пунктир - векторы скрещены.

увеличения угла  $\alpha$ , обладают одной хорошо выраженной особенностью. Например, минимальные значения амплитуд  $A_{VCMIN}$  в точках, через которые проходят элементы упругой симметрии ( $\alpha=0^0$ ) обусловлены, скорее всего, несовершенством преобразователей сдвиговых волн, то есть той долей энергии колебаний, которая проходит и регистрируется в так называемом "темном поле". В этих точках  $A_{VCMIN}$  составляет 0.126-0.141 от величины максимальной амплитуды. Однако по мере увеличения угла  $\alpha$  величина  $A_{VCMIN}$  растет, достигая максимума при  $\alpha = 45-60^0$ . При дальнейшем увеличении угла  $\alpha > 60^0$   $A_{VCMIN}$  уменьшается, достигая, при  $\alpha = 90^0$  значений 0.1-0.126, что близко к величинам, наблюдаемым при  $\alpha = 0$ .

На рисунке 3.3 представлены результаты измерений  $A_{VCMIN}$  в зависимости от величины угла  $\alpha$ . Там же пунктиром нанесена линия, усредняющая полученные результаты.

Таким образом, форма и относительные размеры акустополяриграмм, в особенности диаграммы  $A_{VCMIN}$ , полученные при скрещенных векторах поляризации, могут указывать, например, на степень разориентированности элементов упругой симметрии кристаллических зерен как в образцах поликристаллических, так и полиминеральных сред.

Следует отметить, что проявление эффекта ДСВ будет происходить на фоне обычной смены степени эллиптичности сдвиговых волн по мере их распространения в анизотропных средах (Лямов, 1983). Поэтому метод, применяемый для обнаружения этого эффекта, не должен быть чувствителен к такой смене. Наши наблюдения на модели, рис.3.2, показывают, что акустополяризационный метод пригоден для диагностики эффекта ДСВ. Для такого диагноза наиболее существенными являются следующие заключения.

1. Проявление эффекта ДСВ может иметь место, если на акустополяриграмме ВС наблюдается аномально большой размер между минимумами замеренных амплитуд ( $A_{VCMIN}$ ).

2. По форме и относительным размерам акустополяриграммы, полученной при скрещенных векторах поляризации, можно судить о степени разориентированности элементов упругой симметрии

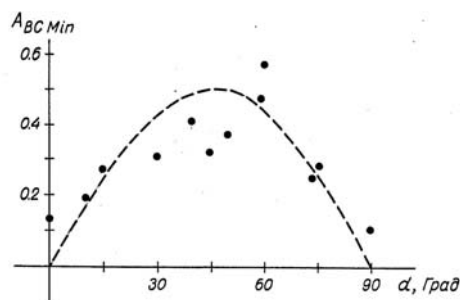


Рис.3.3. Результаты измерений величин амплитуды  $A_{VCMIN}$  (амплитуды в "темном поле") в зависимости от угла  $\alpha$ . Пунктир отражает усредненное изменение  $A_{VCMIN}$  от угла  $\alpha$ .

кристаллических зерен как в образцах поликристаллических, так и полиминеральных материалов.



## 4. АППАРАТУРА ДЛЯ АКУСТОПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

### 4.1. Особенности определения величин скорости распространения упругих колебаний в анизотропных средах

При выборе метода и приборов для цели определения величин скорости распространения упругих колебаний в образцах сильнопоглощающих анизотропных сред большое значение имеют геометрические, волновые и энергетические условия распространения колебаний. Прежде всего кратко рассмотрим геометрические условия передачи энергии в среду от преобразователей-излучателей. В общем виде, колебательная энергия может быть передана через точечный, линейный и источник, излучающий по поверхности (в частном случае - плоскости). Как следует из работ (Скучик, 1976; Бреховских, 1973), амплитуда волны от точечного источника убывает с расстоянием из-за геометрического расхождения энергии на фронте волны (в общем виде - сферическом, в форме эллипсоида или более сложной поверхности), а также в результате поглощения и рассеяния.

При сферическом фронте, из-за геометрического расхождения, амплитуда волны  $A_x$  уменьшается обратно пропорционально расстоянию (Скучик, 1976),

$$A_x = \frac{A_0}{x} e^{-\alpha_s x}, \quad (4.1)$$

где  $A_0$  - начальная амплитуда,  $x$  - расстояние до источника,  $\alpha_s$  - коэффициент поглощения и рассеяния в сферической волне.

Идеализированный линейный источник бесконечной длины возбуждает волну с фронтом в виде цилиндра. С увеличением расстояния  $x$  амплитуда волны уменьшается пропорционально  $1/x$ :

$$A_x = \frac{A_0}{\sqrt{x}} e^{-\alpha_c x}, \quad (4.2)$$

где  $\alpha_c$  - коэффициент поглощения и рассеяния в цилиндрической волне.

Если излучатель является плоским (или точнее, локально-плоским, по Г.И.Петрашню (1980), то потерь на расхождение с увеличением расстояния не происходит. Таким образом, плоский источник в отличие от точечного и линейного, снижает потери волновой энергии при распространении фронта в упругой среде. Такой источник в наибольшей степени пригоден для целей измерения параметров сильнопоглощающих,

неоднородных сред. Такими средами, например, являются горные породы.

Однако, помимо механизмов расхождения, рассеяния и поглощения, на распространение волны очень сильное влияние оказывает упругая анизотропия среды образцов. Причем, как показывает практика, анизотропия упругих свойств наблюдается у минералов, а также регистрируется в изверженных, метаморфических и осадочных породах (Невский, 1974; Чесноков, 1977). Определение величин скорости распространения упругих колебаний в анизотропных породах имеет свои особенности.

Решение этой задачи требует рассмотрения конкретных различий между фазовой  $V_i$  и лучевой (групповой)  $v_i$  скоростями, а также конкретных условий возбуждения и приема колебаний (Петрашень, 1980). Наиболее наглядно различия между  $V_i$  и  $v_i$  прослеживаются на схемах, рис.4.1а, б.

Лучевая скорость  $v_i$  распространения возмущения отсчитывается по лучу, например,  $OM_1$  - для квазипродольной  $qPV$  ( $i = 1$ ),  $OM_2$  - для квазипоперечной  $qSV$  ( $i = 2$ ) и  $OM_3$  - для волны  $qSH$  ( $i = 3$ ). Лучи  $OM_1$ ,  $OM_2$ ,  $OM_3$  являются направлениями распространения волновой энергии. Фазовая скорость  $V_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) характеризует скорость перемещения протяженных участков волновых фронтов в направлении нормалей к ним. Причем, именно величина фазовой скорости  $V_i$  входит в известное уравнение Грина-Кристоффеля (1.1), позволяющее рассчитать все константы упругости анизотропной среды.

В изотропных средах наблюдается равенство лучевой и фазовой скорости по любому из направлений. В анизотропных средах такое

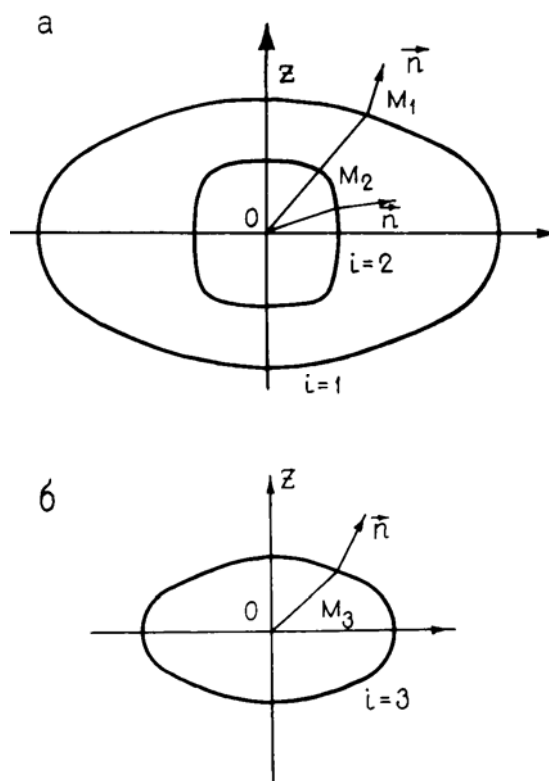


Рис.4.1. Типичные кривые фронта лучевых скоростей  $V_i \vec{n}$  для волн  $i = 1, i = 2$  (а), для волны  $i = 3$  (б), распространяющихся в поперечно-изотропной среде.

равенство наблюдается лишь в некоторых особых направлениях, совпадающих с направленностью элементов упругой симметрии. В изотропной среде кривые лучевых скоростей  $v_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), рис.4.1а, б, являются правильными окружностями, причем окружности  $i = 2, i = 3$  налагаются друг на друга.

В анизотропных средах между  $V_i$  и  $v_i$  всегда наблюдается соотношение (Дьелесан, Руайе, 1982),

$$\frac{1}{V_i}(\bar{n}v_i) = 1, \quad (4.3)$$

означающее, что фазовая скорость  $V_i$  фронта (его элемента) является проекцией лучевой скорости на направление нормали к фронту  $\bar{n}$ .

Рассмотрим более подробно распространение колебаний в произвольной слабоанизотропной среде, рис.4.2. От точечного источника  $O$  в момент времени  $t$  по лучу  $OM'M''$  колебания достигнут точки  $M'$ . В момент времени  $t + \Delta t$  колебания достигнут точки  $M''$ . Луч  $OM'M''$  направлен под углом  $\phi$  к элементу симметрии среды  $OZ$ . Нетрудно показать, что в однородной среде пространственное направление нормали  $\bar{n}$  к фронту волны в точках  $M'$  и  $M''$  в моменты  $t$  и  $t + \Delta t$  будет одно и то же. Угол между нормалью  $\bar{n}$  и элементом симметрии  $OZ$  равен  $\theta$ . От точки  $M'$  до точки  $M''$  вдоль луча  $OM'M''$  колебания проходят за время  $\Delta t$  расстояние  $v_i \Delta t$  с лучевой скоростью  $v_i$ . За это же время фронт волны пройдет расстояние  $V_i \Delta t$  с фазовой скоростью  $V_i$ .

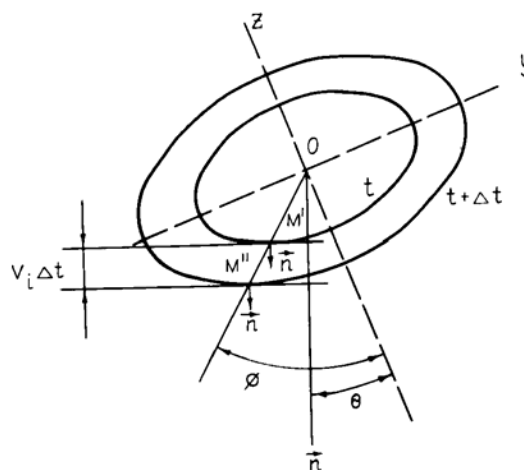


Рис.4.2. Распространение упругих колебаний в однородной слабоанизотропной среде произвольного типа симметрии.

Судя по относительному перемещению точек  $M'$  и  $M''$  (рис.4.2), при точечном источнике колебаний в анизотропной среде по мере распространения колебаний, в общем случае, происходит боковое смещение точек, куда выходит фронт колебаний. Соответственно, по мере увеличения расстояния  $V_i \Delta t$ , точка, в которой будет зафиксирована максимальная амплитуда (максимальная энергия), перемещается все дальше и дальше от нормали  $\bar{n}$ , проходящей через точку  $O$ . Таким образом, при использовании точечных источников и приемников для измерения величин фазовой скорости фронта волны следует наблюдать в

точках  $M'$ ,  $M''$  и так далее, однако расстояние, по которому прошли колебания, следует отсчитывать по нормали  $\vec{n}$ , составляющей угол  $\theta$  с осью симметрии среды  $OZ$ . Практическое выполнение таких действий очень трудоемко.

Рассмотрим теперь особенности распространения лучевых и фазовых фронтов от плоских источников. Плоский (локально плоский) источник колебаний можно представить набором точечных источников, расположенных в плоскости и колеблющихся синхронно, рис.4.3.

Согласно принципу Гюйгенса, волновой фронт представляет собой семейство огибающих, нормаль к крайним точкам которых является нормалью к плоскости, в которой расположены

излучатели. Как следует из рис. 4.3, положение нормали к фронту сохраняется в моменты  $\Delta t$ ,  $\Delta t'$ ,  $\Delta t''$  и любые другие. Как и на схеме рис.4.2 с точечным источником, рис. 4.3 показывает, что нормаль  $\vec{n}$  по отношению к элементу симметрии  $OZ$  сохраняет угол  $\theta$ , который не изменяет своей величины при распространении волнового фронта.

Если точечные источники расположены в одной плоскости, в которой они лежат вплотную друг к другу (плоский источник), то исключая краевые области, излучаемый фронт будет плоским. Элемент  $ds$  подобного фронта перемещается вдоль вектора  $\vec{v}_i$ , оставаясь параллельным самому себе, рис.4.4.

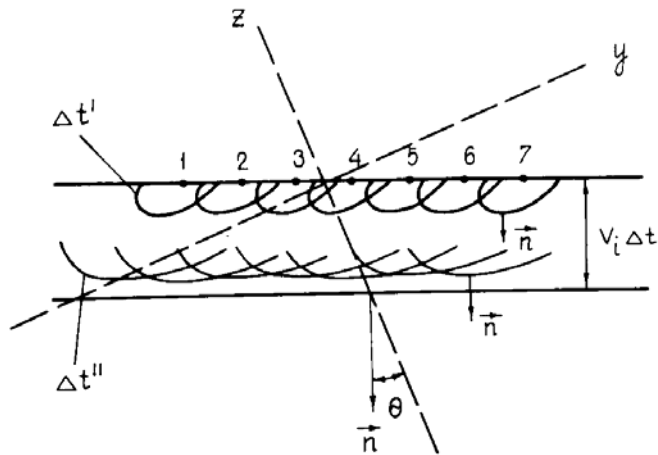


Рис.4.3. Семейство огибающих, представляющих согласно принципу Гюйгенса, фронт колебаний от точечных источников, лежащих в одной плоскости.

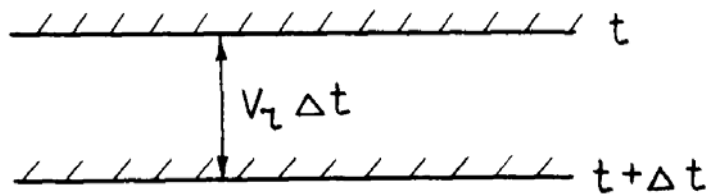


Рис.4.4. Распространение реперного элемента  $ds$  протяженного плоского фронта в анизотропной среде.

Из этого рисунка следует, что за время  $\Delta t$  элемент  $ds$  фронта проходит вдоль вектора  $\vec{v}_i$  от источника к приемнику с лучевой скоростью  $v_i$  и, вместе с этим, вдоль орта  $\vec{n}$  с фазовой скоростью  $V_i$ . Рассмотренные особенности распространения упругих колебаний от точечных и плоских источников имеют место как при распространении квазипродольных, так и квазипоперечных волн при любой направленности их векторов поляризации.

Рисунки 4.3 и 4.4 и соотношение (4.3) позволяют сделать выводы, необходимые для правильного проведения практических измерений:

Время распространения колебаний, отвечающее величине фазовой скорости  $V_i$ , измеряется независимо от ориентации элементов и типа симметрии анизотропной среды в образцах, ограниченных плоскопараллельными поверхностями при помощи плоских (локально-плоских) излучателей и приемников колебаний.

Если при помощи, например, метода акустопляризационных измерений (Горбачевич, 1995) определить направленность элементов симметрии среды, то угол  $\theta$  будет равен углу между нормалью к плоскопараллельным поверхностям, ограничивающим образец, и направленностью элемента симметрии.

Помимо этих условий требуется обеспечить равномерное распределение амплитуд (давлений) в поперечном сечении пучка лучей (в пределах локально-плоского фронта), проходящих от излучателя в образец (Скучик, 1976). Например, в ближней зоне (зоне Френеля) амплитуда колебаний от плоского излучателя, выполненного в виде диска, в поперечном по отношению к оси излучаемого пучка сечении, изменяется сложным образом. В пределах этой зоны наблюдается значительное изменение амплитуды регистрируемых колебаний. Дальняя зона (зона Фраунгофера) начинается на определенном расстоянии фронта волны от излучателя. В этой точке распределение амплитуды по излучающей поверхности становится монотонным. Переход от ближней к дальней зоне совершается при соблюдении следующего условия (Тюлин, 1976),

$$\frac{x}{R} > \frac{R}{\lambda} - \frac{\lambda}{4}, \quad (4.4)$$

где  $x$  - расстояние от плоского излучателя,  $R$  - радиус его излучающей поверхности,  $\lambda$  - длина волны.

Таким образом, для обеспечения равномерного распределения амплитуды в пределах поперечного сечения пучка излучаемых колебаний необходимо применение буферных стержней (звукопроводов), длина которых должна определяться условием (4.4). Длинные звукопроводы также способствуют увеличению размеров участка локально-плоского

фронта. Они часто применяются для повышения точности измерений (MacSkimin, 1950).

В заключение отметим еще одно важное и очевидное требование: при измерении упругих характеристик таких неоднородных и анизотропных сред, как горные породы, - пути распространения пучков лучей продольных и сдвиговых колебаний должны совпадать. Очень важно при этом обеспечить и совпадение контактных условий (Горбачевич, 1995).

Приведенный выше анализ позволяет сформулировать общие требования к измерительной аппаратуре, соблюдение которых обеспечивает корректное и точное измерение величин фазовых скоростей распространения продольных и поперечных волн.

Излучатели и приемники (преобразователи) ультразвука должны быть плоскими (локально плоскими).

Излучающий преобразователь должен формировать нерасходящийся или слаборасходящийся пучок ультразвуковых колебаний.

Для увеличения точности при измерениях необходимо применение буферных стержней (звукопроводов), размер которых больше зоны Френеля.

Колебания в импульсах ультразвуковых колебаний должны быть моночастотными, их частота должна быть одинакова как для продольных, так и сдвиговых волн.

Путь, по которому распространяются пучки лучей продольных и поперечных волн должен быть одним и тем же. Одинаковыми должны быть и контактные условия на границе образец-преобразователь.

#### **4.2. Требования к приборам и материалам**

Для проведения акустополаризационных определений и измерений величин скорости распространения упругих колебаний в анизотропных образцах можно применять импульсные ультразвуковые приборы (дефектоскопы) типа УК-66ПМ, УД-10П, УД-23УМ, УС-13ИМ, УД2-12, УД2-16 и другие, с осциллографической - на электронно-лучевой трубке (ЭЛТ) и цифровой индикацией результатов. Частота повторения зондирующих импульсов должна быть выше 25 Гц, а коэффициент усиления - не менее  $1 \cdot 10^5$ . Необходимо также наличие ступенчатой регулировки входного сигнала через 1 дБ в пределах от 0 до 60 дБ. Полоса пропускания прибора может изменяться в пределах 0.4-10.0 МГц. Точность определения времени пробега ультразвукового импульса должна составлять не менее  $1 \cdot 10^{-7}$  -  $1 \cdot 10^{-8}$  с, а длительность развертки - в пределах  $(10-200) \cdot 10^{-6}$  с на экран.

Указанной точности определения времени позволяет достичь схема, предусматривающая подключение частотомера или измерителя временных интервалов, используемых в режиме отсчета малых временных интервалов, к ультразвуковым дефектоскопам. При этом, импульс от генератора импульсов прибора подается на вход таких приборов. Он запускает начало отсчета времени, а импульс с приемника УЗК, усиленный усилителем прибора (или строб-импульс), употребляют для остановки счета.

Для акустополаризационных определений и измерения скорости необходимы преобразователи, излучающие интенсивные, линейно-поляризованные чисто сдвиговые колебания (Бергман, 1957). Этим требованиям отвечают преобразователи, конструкции которых приведены в работе (Горбачевич, 1995). Наиболее эффективным является преобразователь, в котором звукопровод состоит из двух частей (рис.4.5).

Основная частота колебаний преобразователей определяется собственной частотой пьезопластины и может составлять  $f_0 = 0.4-10.0$  МГц. Для определений необходимо иметь 2 пары преобразователей сдвиговых колебаний, одну, например, с собственной частотой 0.7 МГц, вторую - 1.1 МГц. На корпусе преобразователей должна находиться отметка направления вектора поляризации (ВП).

Подготовленные к измерениям преобразователи сдвиговых колебаний необходимо подвергнуть проверке. С этой целью, два конструктивно одинаковых, рассчитанных на одну и ту же собственную частоту преобразователя при помощи специальной контактной среды соединяются рабочими поверхностями. Отметки ВП на излучателе и приемнике колебаний совмещаются. Возникший на экране ЭЛТ импульс сдвиговых колебаний должен состоять из 6-10 отдельных периодов (рис.4.6).

Колебания в импульсе должны быть моночастотными, близкими к гармоническим и не искажены изломами. Проверку проводят в следующем порядке:

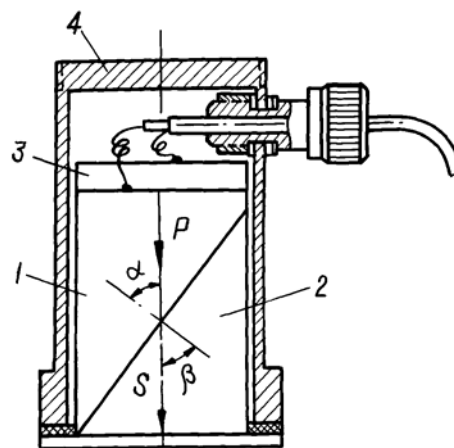


Рис.4.5. Устройство преобразователя сдвиговых колебаний с прохождением луча через части звукопровода по прямой линии.

1 – первая часть, 2 – вторая часть звукопровода; 3 – пьезопластина; 4 – корпус.

P, S – лучи продольных и поперечных колебаний, соответственно.

1. Измеряют амплитуду  $A_{PM}$  импульса, расположенного по линии развертки перед импульсом сдвиговых колебаний и амплитуду  $A_{VPM1}$  (рис.4.6). Отношение импульсов должно подчиняться неравенству  $A_{PM}/A_{VPM1} \leq 0.1$ .

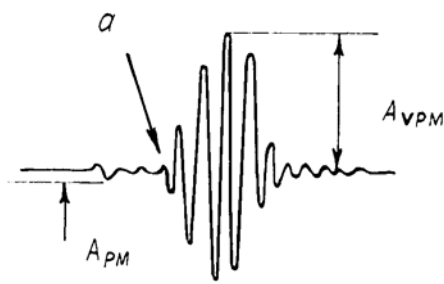


Рис.4.6. Импульс волны сдвиговых колебаний на экране ультразвукового прибора.

2. Поворачивают один из преобразователей на угол  $+90^0$  от положения ВП другого и фиксируют минимум сигнала  $A_{VCM1}$ . Затем тот же преобразователь поворачивают на угол  $-90^0$  от положения ВП другого и фиксируют амплитуду импульса  $A_{VCM2}$ . Измеренные величины должны находиться в соотношении  $A_{VCM1}/A_{VPM1} \leq 0.15$ ,  $A_{VCM2}/A_{VPM1} \leq 0.15$  и отличаться друг от друга не более чем на 10%.

3. Один из преобразователей поворачивают на угол  $180^0$  от положения ВП другого. Измеренная амплитуда  $A_{VPM2}$  огибающей импульса должна отличаться от  $A_{VPM1}$  не более чем на 10%.

Еще более качественную проверку пары преобразователей можно выполнить, построив индикатрису  $A_{VPM}$  при взаимном повороте их векторов поляризации (рис.4.7). Если преобразователи излучают линейно-поляризованные чисто сдвиговые колебания, то точки индикатриссы должны ложиться на линию правильной окружности (Волкова, 1974).

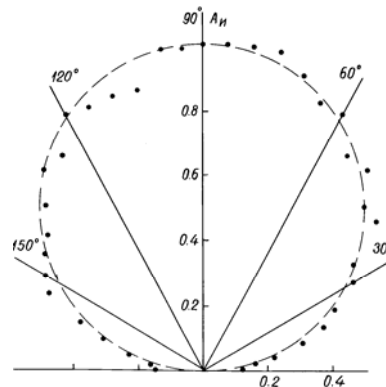


Рис.4.7. Индикатрисса  $A_{VPM}$  преобразователей при взаимном повороте их векторов поляризации.

Как известно, для эффективной передачи продольных колебаний от преобразователей к образцу пригодны вода, минеральные смазки, глицерин. При необходимости проведения измерений на большом числе образцов на контактные площадки преобразователей наклеиваются пластины из вакуумной резины толщиной 3-5 мм, которые служат контактной средой. Аналогичной контактной средой может быть полиуретан. Однако передача сдвиговых колебаний через контакты связана с определенными трудностями.

В соответствии с физическим смыслом, жидкости, т.е. среды, которые занимают форму того сосуда, куда они помещены, не обладают сдвиговой упругостью и не могут проводить сдвиговые колебания. Пользоваться способом приклейки преобразователей к образцу твердеющими клеями



очень трудоемко (Меркулов, 1968). Имеются многочисленные попытки использовать для передачи сдвиговых колебаний от преобразователей к образцу воду, трансформаторное масло (Волков, Гребенник, 1988), раствор канифоли в спирте, глицерин, неотвержденные эпоксидные смолы (Алешин и др., 1968). В последней работе утверждается, что наибольший эффект достигается при применении жидкостей с большой вязкостью, - чем выше вязкость, тем меньше потери. В результате серии опытов нами установлено, что более других подходят жидкости со свойствами полимеров, обладающие низкой сдвиговой упругостью на низких частотах воздействия и высокой сдвиговой упругостью на ультразвуковых частотах. К средам с необходимыми свойствами относятся, например, неотвержденные эпоксидные смолы. Однако эпоксидные смолы токсичны, с трудом удаляются с образца при помощи агрессивных жидкостей, таких как ацетон.

Для передачи сдвиговых колебаний в качестве контактной среды нами длительное время используется высоковязкий раствор некристаллизирующихся полисахаридов (Горбачевич, 1982). Такой раствор можно приготовить, например, из искусственного меда. Путем выпаривания кипячением раствор доводится до высокой вязкости. Вязкость раствора проверяют при высокой температуре. Раствор, набранный на какой-либо стержень, не должен с него стекать. Приготовленная подобным образом контактная среда эффективно проводит сдвиговые колебания при частотах от 0.3 Мгц и выше, допускает вращение преобразователей относительно образца со скоростью около 1 об/мин, легко удаляется водой.

#### **4.3. Конструкция акустополярископа с поворотной платформой**

В последнее время разработано несколько конструкций акустополярископов (Горбачевич, 1995) двух основных типов, - с поворотной рукоятью и с поворотной платформой. Нами наиболее часто применяется акустополярископ с поворотной платформой (Авт. свид. 1281993). В конструкции акустополярископа с поворотной платформой в процессе измерений образец, закрепленный на поворотной платформе, поворачивается относительно неподвижных ультразвуковых преобразователей (рис.4.8).

Прибор состоит из основания 1, закрепленной в нем стойки 2 и расположенном на стойке кронштейне 3. Через втулку кронштейна проходит подвижный шток 4. На нижнем конце штока и в основании имеются гнезда, в которых расположены верхний и нижний преобразователи 5. Они предназначены для излучения и приема сдвиговых линейно-поляризованных колебаний. Образец 6 закрепляется при помощи держателей на поворотной платформе 7.

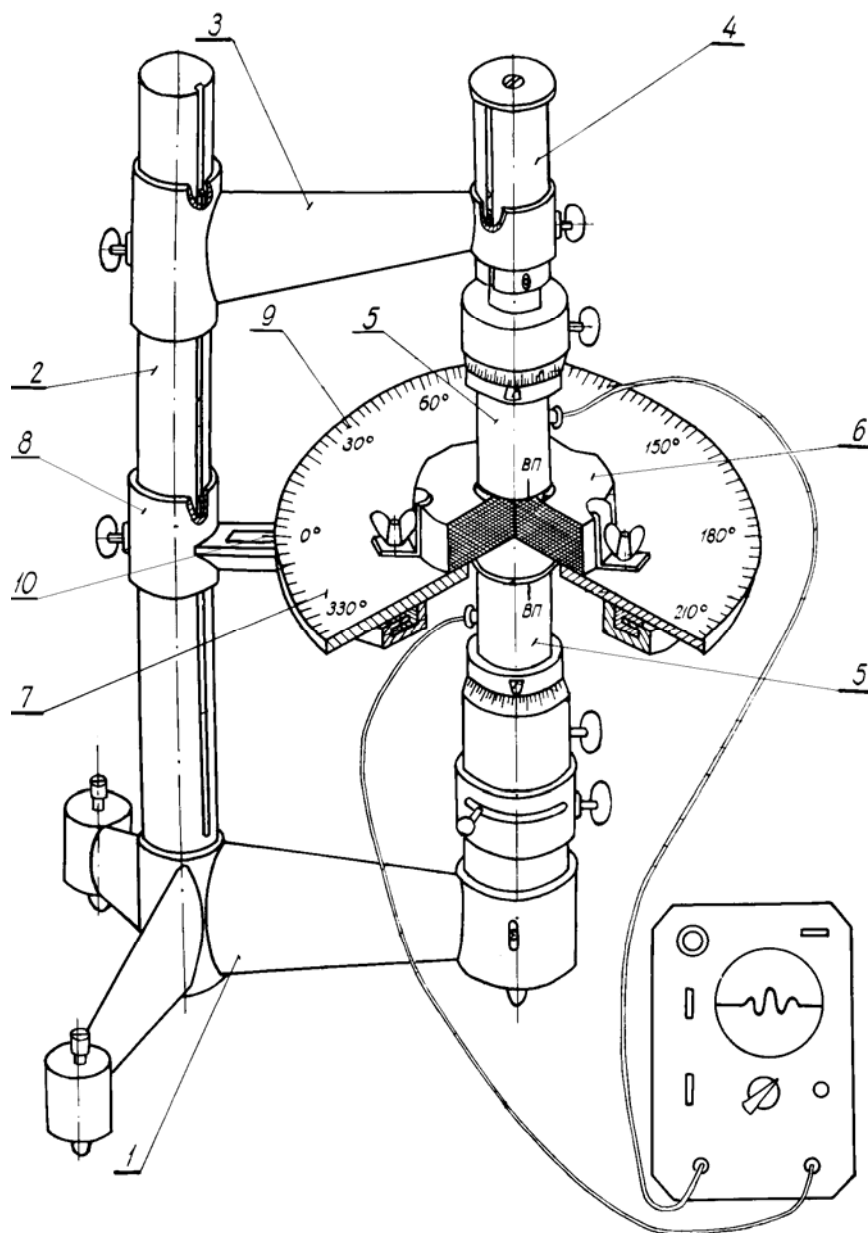


Рис.4.8. Конструкция акустополарископа с поворотной платформой.  
 1 – основание; 2 – стойка; 3 – кронштейн; 4 – подвижный шток; 5 – преобразователи; 6 – образец; 7 – поворотная платформа; 8 – дополнительный кронштейн; 9 – шкала углов; 10 – указатель.

Сама же поворотная платформа установлена на дополнительном кронштейне 8. На поворотной платформе имеется шкала 9, предназначенная для отсчета угла поворота образца относительно

векторов поляризации (ВП) преобразователей. Отсчет этого угла производится относительно метки 10 на дополнительном кронштейне. По длине стойки 2 и штока 4 выполнены пазы, а во втулках кронштейнов закреплены шпонки и стопоры, предназначенные для фиксации положений кронштейнов и штоков. Конструкция верхнего и нижнего гнезд предусматривает возможность поворота закрепленных в них преобразователей. Для отсчета углов взаимного поворота преобразователей на гнездах нанесены угловые шкалы.

Основание гнезда верхнего преобразователя входит в полость штока, в которой находится пружина. В прорези штока имеется штифт, закрепленный в основании гнезда. Штифт и прорезь обеспечивают начальное сжатие пружины и упругий ход преобразователя в направлении его оси. Основание гнезда нижнего преобразователя входит в полость обечайки основания 1. В этой полости также размещена пружина, обеспечивающая, как и соответствующие штифт и прорезь, упругое перемещение преобразователя (без его поворота) в направлении его оси. Дополнительно в нижнем гнезде имеется внешний и внутренний стаканы.

Во внешнем стакане расположен кольцевой паз, а с внутренним стаканом соединена рукоятка, выходящая из паза наружу. Стаканы, кольцевой паз и рукоятка позволяют производить поворот нижнего преобразователя в точности на угол  $90^0$ . Во внешнем стакане имеется фиксатор, позволяющий закреплять рукоятку в каждом из крайних ее положений. Электрокабели преобразователей 5 подключены к ультразвуковому прибору.

Как следует из схемы, рис.4.8, наличие поворотной платформы, выполненной с отверстием по центру, со шкалой углов и с держателем образца позволяет выполнить измерения в пределах полного угла поворота образца относительно вектора поляризации преобразователей. Подпружинивание гнезд преобразователей позволяет устранить зазоры между контактными поверхностями преобразователей и образца. Фото прибора приведено на рис.4.9.

Еще более совершенный вариант акустополярископа с поворотной платформой на трех стойках (рис.4.10) имеет шарнир Кардана, соединенный со стаканом верхнего преобразователя. Общая нагрузка на контактные поверхности преобразователей и образца осуществляется через одну пружину.

Последняя из конструкций имеет механический привод поворотной платформы, рис.4.11. Поворотная платформа через червячное колесо, расположенное на ее ободке, получает движение от электродвигателя. Показывающий прибор соединен при помощи специального контроллера с персональным компьютером. Регистрируемые амплитуды огибающих прошедшего образец сигнала оцифровываются и обрабатываются.

Компьютер строит и выдает на принтер готовые акустополяриграммы ВП и ВС.



Рис.4.9. Общий вид акустополярископа с поворотной платформой (по авт. свид. № 1281993). Вариант с одной стойкой.

Наличие шарнира Кардана существенно уменьшает погрешности при измерениях даже при некоторой непараллельности граней образца.

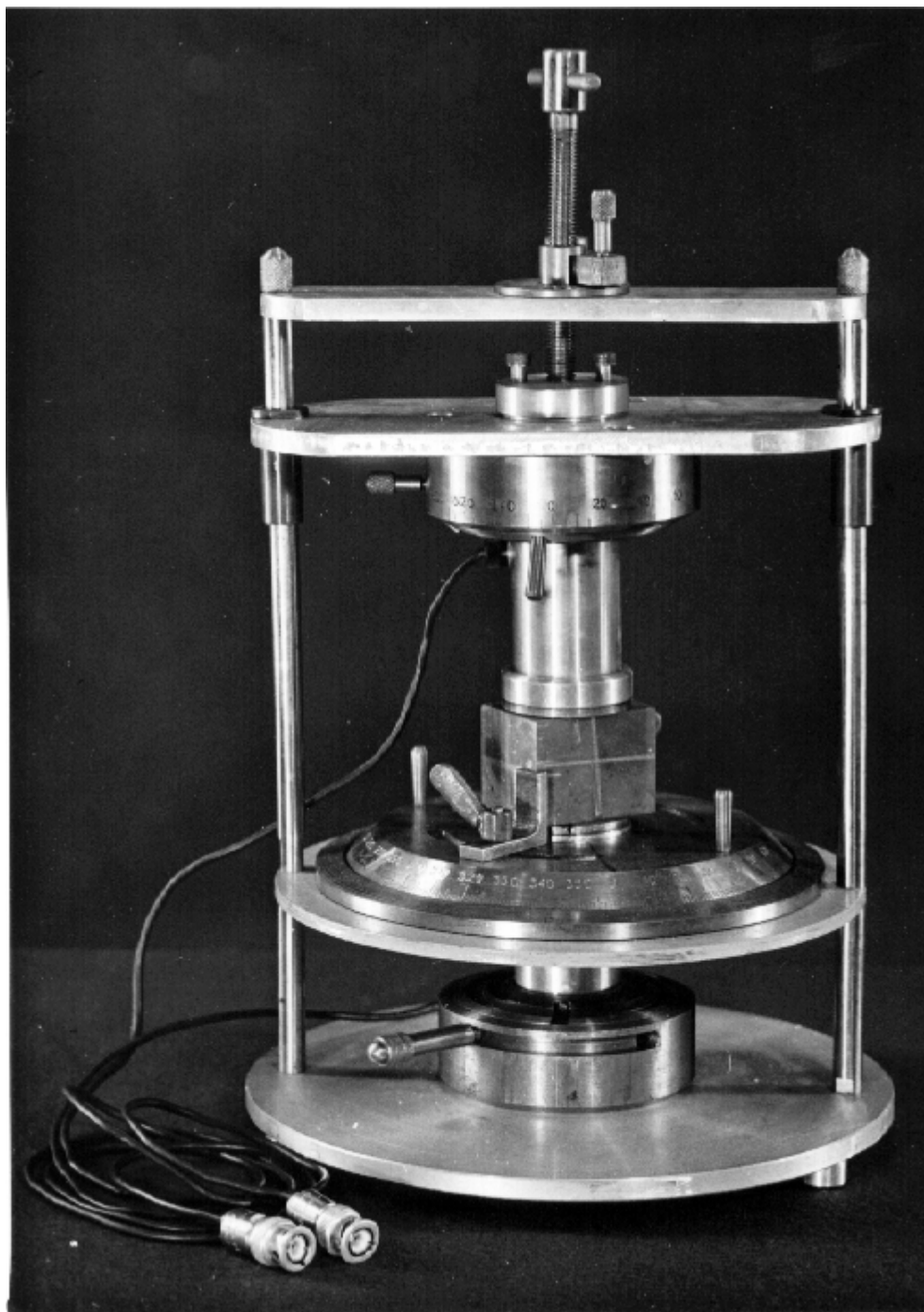


Рис.4.10. Общий вид акустополарископа с поворотной платформой. Вариант с тремя стойками.

Проиллюстрированные варианты конструкции акустополарископов (рис.4.9-4.11) позволяют выполнять акустополаризационные измерения в

широком диапазоне ультразвуковых частот (0.4-3.0 МГц) и размеров образцов (10-100 мм).

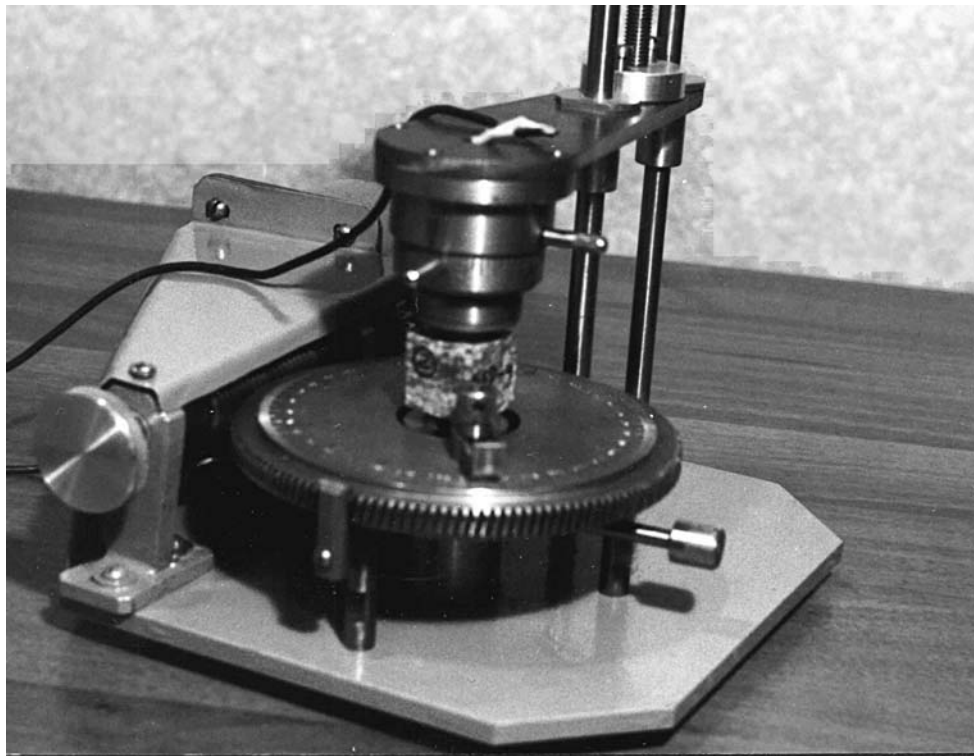


Рис.4.11. Общий вид автоматического акустополярископа (авторы конструкции О.С. Головатая, Ф.Ф. Горбачевич).

#### **4.4. Комбинированные преобразователи для излучения и приема продольных и сдвиговых колебаний**

Используя процессы отражения и преобразования на границе раздела сред, нами разработаны комбинированные (совмещенные) преобразователи продольных и сдвиговых колебаний (Горбачевич, 1995). Устройство одного из таких преобразователей представлено на рис.4.12. В защитном корпусе 1 преобразователя находятся пьезопластины 2 продольных колебаний, приклеенные к звукопроводу, состоящему из двух частей, контактной 3 и торцевой 4. На контактной части звукопровода выполнены ребра для ослабления части колебаний, передаваемых по поверхности звукопровода. Контактная часть звукопровода выполнена из электролитической меди ( $V_p = 4.75$  км/с,  $V_s = 2.26$  км/с), а торцевая часть - из свинца ( $V_p = 2.16$  км/с).

При подаче электрического импульса на пьезопластину, расположенную на торцевой части звукопровода, возбуждается импульс

продольных колебаний, который на плоскости, разделяющую контактную и торцевую части, преобразуется в импульс поперечных колебаний. Последний через контактную плоскость попадет в образец. Возникший при подаче напряжения на пьезопластину импульс продольных колебаний, отразится от разделяющей плоскости. Затем под углом отражения, равным углу падения, также через контактную поверхность, без преобразования в импульс поперечных колебаний, попадет в образец. На основе использования

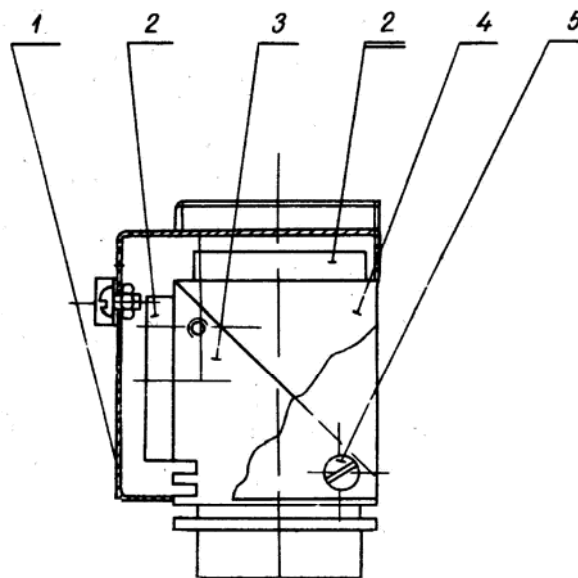


Рис.4.12. Конструкция комбинированного преобразователя на средах свинец-медь. 1 - защитный корпус; 2 - пьезоэлементы; 3 - контактная часть звукопровода; 4 - торцевая часть звукопровода; 5 - крепление защитного корпуса к звукопроводу.

комбинированного преобразователя такого типа был разработан совмещенный измеритель скорости распространения упругих колебаний, рис.4.13. Измеритель состоит из пары комбинированных преобразователей ультразвуковых колебаний 1, штатива 2, переключателя вида работы 3, ультразвукового прибора 4, соединенного с электронным частотомером 5, используемого в качестве измерителя малых отрезков времени. Внешний вид прибора приведен на рис.4.14. Принцип работы следует из схемы рис.4.13. В зависимости от того, какие из пьезоэлементов комбинированных преобразователей подключены переключателем 3 к прибору, в образец излучаются либо продольные, либо сдвиговые колебания.

Особенностью конструкции специального переключателя является наличие отдельных полностью экранированных друг от друга отсеков, - генераторного и приемного. Переключение пьезопластин для излучения и приема либо продольных, либо поперечных колебаний производится переключателями при помощи общей рукоятки.

Для крепления комбинированных преобразователей, сохранения плоскопараллельности их контактных поверхностей при взаимном перемещении сконструирован специальный штатив.

Достоинства измерителя состоят в том, что он сокращает время, необходимое для измерения констант упругости твердых сред, так как измерение величин  $V_p$  и  $V_s$  производится при одном приложении преобразователей к образцу. При этом повышается точность определения констант упругости материалов, за счет полного совпадения контактных условий, частоты и путей распространения лучей продольных и поперечных колебаний.

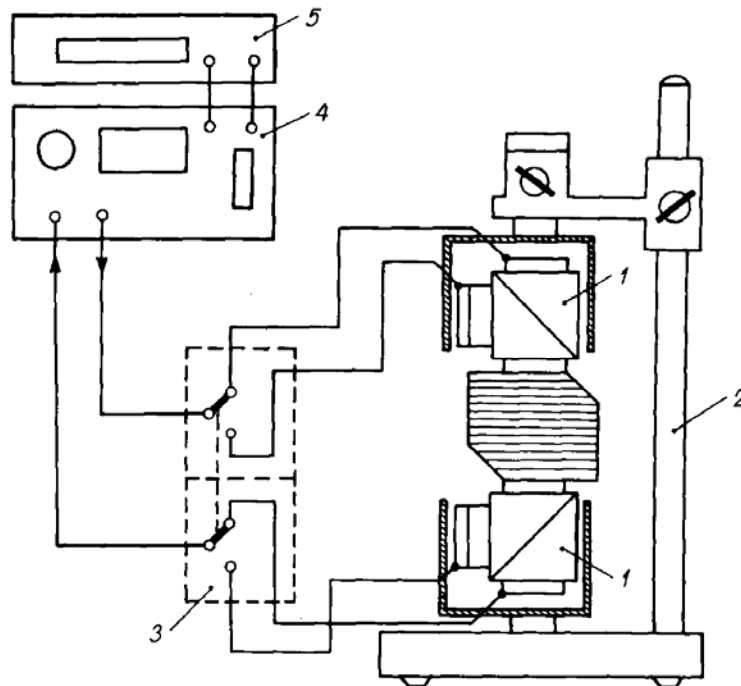


Рис.4.13. Схема совмещенного измерителя скорости распространения упругих колебаний. 1 - преобразователи, 2 - штатив, 3 - переключатель вида работы, 4 - ультразвуковой прибор, 5 -электронно-счетный частотомер.

Изложенные выше принципы измерений, которыми следует руководствоваться при экспериментальных исследованиях упругих характеристик анизотропных твердых сред, позволяют сделать вывод, что для получения корректных данных вначале следует выполнить определения направленности элементов симметрии методом акустополарископии. Затем производят измерения плотности и скорости распространения продольных и поперечных колебаний в направлениях, согласованных с выявленными элементами симметрии.

Следует отметить, что время распространения колебаний, отвечающее величине фазовой скорости, измеряется независимо от ориентации элементов и типа симметрии анизотропной среды в образцах,



ограниченных плоскопараллельными поверхностями при помощи плоских (локально-плоских) излучателей и приемников колебаний.

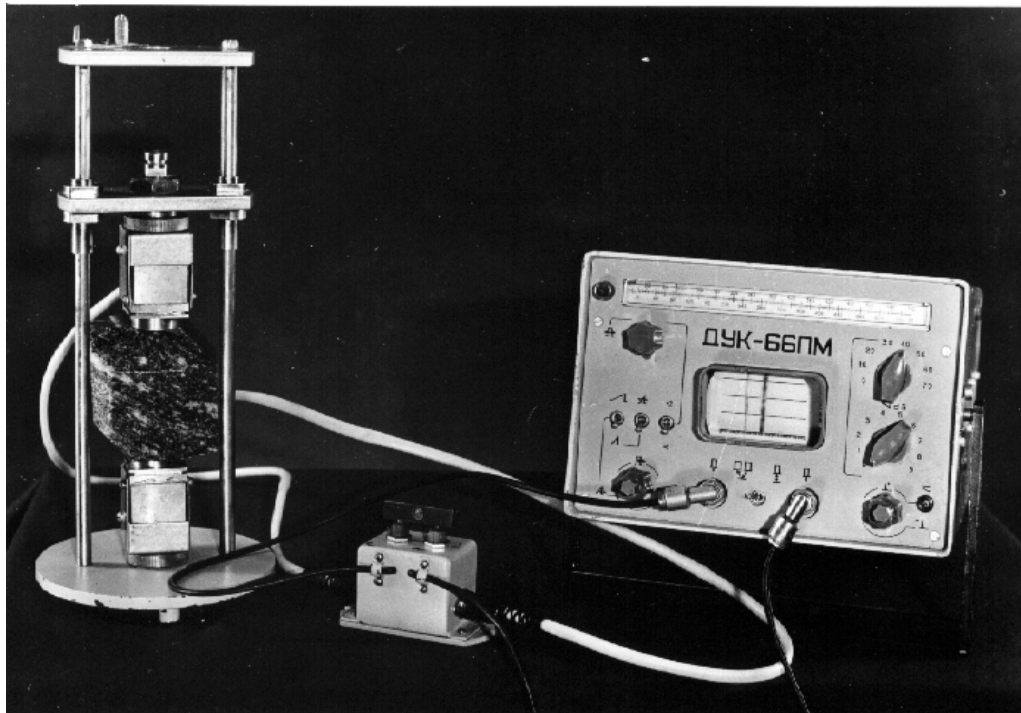


Рис.4.14. Внешний вид совмещенного измерителя скорости распространения упругих колебаний (без измерителя временных интервалов).

Приборы акустоплярископ и измеритель скорости восполняют недостаток среди набора аппаратуры, необходимой для определения всех параметров упругих и неупругих свойств анизотропного, неоднородного твердого тела.

## 5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ АКУСТОПОЛЯРИСКОПИИ

### 5.1. Общие требования к измерениям

Исследование упругих свойств анизотропных сред предполагает подготовку образца к испытаниям, получение акустополаризационных диаграмм, построение пространственного положения элементов упругой симметрии, определение величин скорости распространения упругих колебаний (продольных и сдвиговых) вдоль выявленных элементов и под определенными углами к ним. Последним этапом является определение типа симметрии и расчет констант упругости образца.

Как известно, акустополарископия образца в каком-либо одном направлении позволяет получить только одну проекцию элементов (например, оси и плоскости) упругой симметрии среды. Кроме этого, измерения характеристик упругости, выполненные в направлении оси симметрии среды поперечно-изотропной симметрии, не позволяют отличить этот тип симметрии, от изотропной (Федоров, 1965; Шаскольская, 1976). Диагностика таких сред возможна лишь при получении данных в двух неэквивалентных проекциях. Построение пространственного

положения элемента симметрии любой среды возможно на основе не менее двух проекций. Поэтому предпочтительной формой образца, подготовленного для испытаний, является куб или параллелепипед. Измерения, выполненные по двум парам граней на образце в форме куба, позволяют, как правило, определить проекции двух элементов симметрии. Измерения, выполненные по третьей паре граней, позволяют подтвердить правильность определений, выполненных по двум другим. Это контрольное измерение позволяет увеличить надежность определений.

Конечным итогом комплекса измерений является определение взаимного пространственного положения элементов упругой симметрии

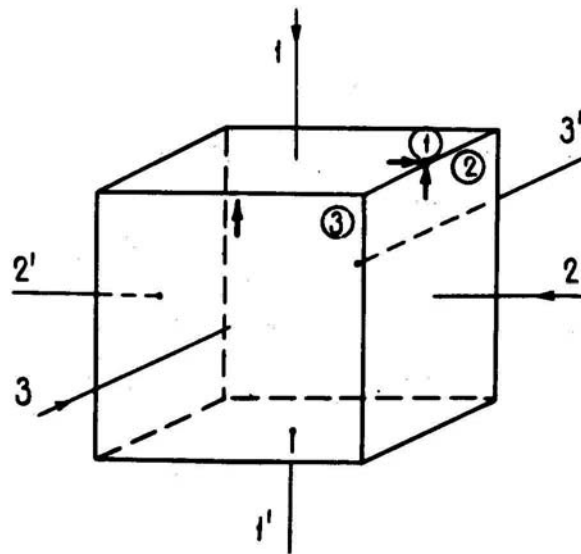


Рис.5.1. Схема индексации образца.

среды, типа ее симметрии, степени анизотропии и величин констант упругости или жесткости (Най, 1960).

Отбор проб для последующего изготовления образцов должен отвечать определенным требованиям (Акустополяриметрия..., 1990). Например, при обработке пробы горной породы одну из граней образуемого образца рациональнее всего выпилить так, чтобы она совпадала с плоскостью слоистости, а ребро - в направлении линейности, выделенной в плоскости слоистости. Линейность может быть определена, например, по форме зерен минералов удлиненной формы (амфибола, биотита и др.). Если в породе не видны какие-либо плоскостные и линейные элементы, ориентировка граней образца может быть любой. Она может быть также связана с горнотехнологическими параметрами, например, направленностью оси скважины, горной выработки. Направленность граней минеральных образцов должна определяться ориентировкой кристаллографических элементов симметрии.

Минимальную длину ребра кубика  $l$  определяют из соотношения (ГОСТ 21153.0-75),

$$l \geq V_p \frac{dt}{\delta_v}, \quad (5.1)$$

где  $V_p$  - скорость распространения продольных колебаний;  $dt$  - абсолютная погрешность отсчета времени, равная половине цены деления шкалы отсчета измерительного прибора,  $\delta_v$  - заданная относительная погрешность измерения скорости. Минимальный размер  $l$  также должен подчиняться условию

$$l \geq 3V_p/f_0 \quad (5.2)$$

В стандартах, в том числе и зарубежных (ГОСТ 21153.0-75, D2845-83) указаны размеры образцов, удовлетворяющие вышеприведенным условиям.

Грани образцов обрабатываются и шлифуются таким образом, чтобы обеспечивалась воспроизводимость результатов. Вид образца, подготовленного к измерениям и схема его индексации, приведены на рис.5.1.

## 5.2. Юстировка акустополярископа

Перед началом проведения акустополярископии необходимо провести юстировку акустополярископа. Целью первого этапа юстировки является определение взаимного положения векторов поляризации (ВПО) верхнего и нижнего преобразователей. На втором этапе производится

установка преобразователей таким образом, чтобы ВПО нижнего преобразователя был ориентирован на  $0^0$  шкалы углов поворотной платформы (рис.4.8). В положении "векторы параллельны" направление ВПО верхнего преобразователя должно совпадать с ВПО нижнего.

Для проведения второго этапа юстировки необходим анизотропный материал с хорошо известным направлением элементов симметрии в нем. Из этого материала нужно изготовить длинный брусок таким образом, чтобы его длинная сторона была параллельна элементу симметрии. Длина такого пробного бруска должна быть равна диаметру шкалы углов поворотной платформы. Его ширина должна быть не меньше диаметра контактной поверхности преобразователей. В качестве такой среды можно применить отрезок деревянной линейки с четко выраженной линейной текстурой. Вдоль линий текстуры через центр линейки, для лучшей ориентировки, следует провести маркировочную линию.

Юстировка акустополярископа состоит из следующих операций.

1. Вставить преобразователи в гнезда акустополярископа и закрепить их стопорными винтами.

2. Нанести контактную среду на центры рабочих поверхностей преобразователей.

3. Перевести переводную рукоятку прибора влево до упора, в положение "векторы скрещены" и закрепить ее.

4. Совместить рабочие поверхности преобразователей, освободить стопор поворота верхней обоймы и, наблюдая за сигналом по экрану прибора, найти положение ВС (векторы скрещены) при котором амплитуда сигнала на экране прибора будет минимальна. Затем закрепить стопор поворота верхней обоймы.

5. Нанести с двух сторон пробного бруска по капле контактной среды и вставить его между преобразователями.

6. Поворачивая брусок вокруг оси, проходящей через центры преобразователей, находят его положение, при котором на экране прибора наблюдается минимум сигнала.

7. Совместив ноль шкалы поворотной платформы с указателем (меткой) угла поворота, отсчитать угол  $\alpha_1$  между указателем угла поворота и маркировочной линией на бруске. Разведя рабочие поверхности преобразователей, вынуть брусок из зазора между ними.

8. Освободив стопорный винт, повернуть нижний преобразователь на угол  $\alpha_1$ , в сторону, противоположную направлению отсчета угла  $\alpha_1$  от указателя угла поворота. После этого снова закрепить нижний преобразователь в гнезде стопорным винтом.

9. Нанести контактную среду на центры рабочих поверхностей преобразователей, совместить рабочие поверхности преобразователей. Освободить стопор поворота верхней обоймы и, наблюдая за сигналом по экрану прибора, снова найти положение ВС (см.п.4). Затем закрепить стопор поворота верхней обоймы.

10. Выполнить операции по пп. 5, 6. Если маркировочная линия на бруске точно совпадает с указателем угла поворота (а при нулевой отметке шкалы поворотной платформы, совмещенной с указателем, линия проходит через  $0^0$  и  $180^0$  шкалы) юстировка может считаться законченной. Однако, если между линией текстуры и меткой указателя угла поворота наблюдается некоторый угол  $\alpha_2$ , операции по пп. 5-9 следует повторить.

После всех операций юстировки переводную рукоятку переводят вправо до упора в положение "векторы параллельны" и закрепляют ее в этом положении. При этом векторы поляризации преобразователей расположены на линии, проходящей через указатель угла поворота поворотной платформы и центры контактных площадок.

### 5.3. Проведение акустополярископии

Целью этапа проведения поляризационных измерений образцов испытуемых сред является определение степени упругой анизотропии, эффекта линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП), пространственной ориентации элементов упругой симметрии. Порядок измерений сравнительно полно изложен в работах (Lucas, 1961; Акустополаризационные..., 1985). Определения проводятся при помощи акустополарископов конструкций, приведенных на рис.4.9, 4.10.

Перед измерениями преобразователи сдвиговых колебаний подключают к ультразвуковому прибору таким образом, чтобы верхний преобразователь был излучающим. Затем подвижную платформу устанавливают на нулевую отметку шкалы углов, напротив метки на дополнительном кронштейне. Отметки векторов поляризации преобразователей совмещают по одной линии. Смазывают контактные поверхности преобразователей и рабочие грани образца контактной средой. При этом следует следить, чтобы контактная среда, без разрывов и пузырей, покрывала полностью контактные поверхности преобразователей и образца. После установки образца на контактной поверхности нижнего преобразователя и закрепления его на поворотной платформе, шток с верхним преобразователем подают вниз, до обеспечения акустического контакта преобразователей с образцом. При этом, сжимая пружину в основании штока и фиксируя ее в сжатом состоянии, обеспечивают равномерное давление контактных площадок преобразователей на грани образца. Требуется некоторое время, в течение которого контактная среда образует тонкий равномерный слой в зазоре между преобразователем и образцом. Как правило, по окончании этого времени амплитуда сдвигового импульса (рис.4.6) на экране прибора перестает увеличиваться.

Измерения заключаются в передвижении поворотной платформы с шагом  $1^{\circ}$ ,  $5^{\circ}$  или  $10^{\circ}$  и фиксации амплитуды импульса  $A_{врм}$  проходящих через образец сдвиговых колебаний, рис. 5.2. Измерения в положении ВП (векторы параллельны) заканчивают, когда указатель отсчета углов будет установлен на отметку  $360^{\circ}$  шкалы. В процессе измерений, для исключения влияния нелинейности внутренних электрических цепей ультразвукового прибора и его усилителя, при помощи рукояток входного ослабителя сигнала (аттенюатора) рекомендуется поддерживать одинаковый размер сигнала на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). В этом случае мера ослабления в децибелах будет отражать относительные изменения уровня сигнала в процессе измерений.

После завершения измерений в положении ВП освобождают фиксатор и при помощи рукоятки нижний преобразователь поворачивают на угол  $90^{\circ}$ , затем фиксируют его в этом положении. Таким образом, векторы поляризации преобразователей оказываются в скрещенном положении (положение ВС). Серию измерений амплитуд  $A_{всм}$  (в положении ВС) выполняют с тем же шагом в пределах полного угла  $2\pi$  поворота платформы.

Если в пределах угла поворота  $0-360^{\circ}$  изменений относительных амплитуд как в положении ВП, так и в положении ВС не наблюдаются, следует повторить измерения, установив в гнезда акустополарископа преобразователи с собственной частотой, не кратной первоначальной.

Для повышения точности, измерения могут быть продублированы при обратном ходе

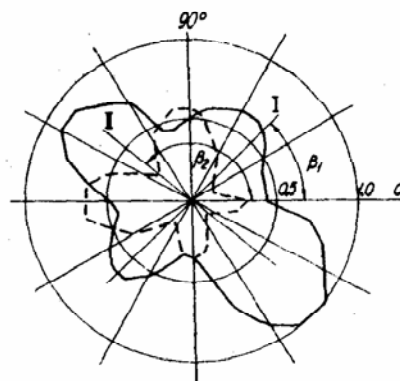


Рис.5.2. Акустополариграмма образца метадиабазы, полученная при параллельных (сплошная линия) и скрещенных (пунктир) векторах поляризации преобразователей. I, II - проекции элементов симметрии;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  - углы между направлениями проекций элементов симметрии и гранью образца.

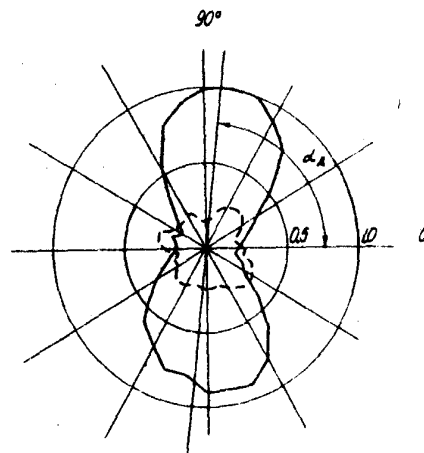


Рис.5.3. Акустополариграмма образца амфиболита с проявлением эффекта линейной акустической анизотропии поглощения,  $\alpha_d$  - угол между направлением оси наибольшего "пропускания" и гранью образца.

поворотной рукояти или платформы. Такая мера позволит оценить влияние изменения толщины контактной среды под действием пружины и исключить ее влияние при обработке данных.

После наблюдения изменений амплитуд  $A_{впм}$ ,  $A_{всм}$  производят построение акустополяриграмм в следующем порядке:

1) просматривают значения  $A_{впм}$  (в децибелах) в пределах углов  $0-360^0$  и находят наибольшее из них по величине ( $A_{max}$ );

2) производят вычитание каждого  $A_{впм}$  из значения  $A_{max}$ ;  $B_{вп} = A_{max} - A_{впм}$ , дБ;

3) производят вычитание  $A_{всм}$  из значения  $A_{max}$ ;  $B_{вс} = A_{max} - A_{всм}$ , дБ;

4) пользуясь таблицей перевода децибел в относительные амплитуды по значениям  $B_{вп}$ ,  $B_{вс}$ , находят соответствующие относительные амплитуды  $A_{впм}$ ,  $A_{всм}$ , которые являются исходными для построения акустополяриграмм. Как правило, акустополяриграммы строят в полярных координатах.

Точки  $A_{впм}$  соединяются сплошными линиями,  $A_{всм}$  - пунктиром. Фигура, очерченная сплошной линией, является акустополяриграммой ВП, очерченная пунктиром - ВС (рис. 5.2).

Имеется компьютерная программа ввода данных и построения акустополяриграмм, см. Приложение 1.

По акустополяриграмме ВП определяют степень проявления эффекта ЛААП среды  $D$  и угол  $\alpha_D$  направления наибольшего "пропускания" (НП), рис. 5.3. Угол  $\alpha_D$  определяется между осью  $O$  координат и прямой, проведенной через полярную ось и противостоящие максимумы  $A_{впм1}$  и  $A_{впм2}$ . Степень ЛААП рассчитывается по формуле (2.3).

На акустополяриграмме ВС через полярную ось и противостоящие минимумы огибающей  $A_{всм}$  проводят прямые линии, рис.5.2. Эти линии являются проекциями осей и плоскостей симметрии среды образца. Углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$  между осью координат и проведенными прямыми позволяют зафиксировать положение проекций элементов симметрии относительно граней образца.

На конечном этапе проекции элементов симметрии переносят на грани образца, рис.5.4. Они характеризуют особенности упругой анизотропии среды в трех взаимно-перпендикулярных направлениях. Параметры пространственной ориентировки элементов упругой симметрии могут быть определены при

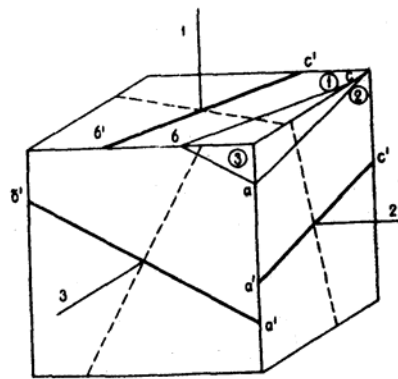


Рис.5.4. Проекции элементов симметрии, нанесенные по данным акустополаризационных измерений на грани образца

помощи стереографической проекции (сетки) Вульфа (Акустопляриметрия..., 1990). В том случае, если выявленные элементы симметрии расположены не параллельно граням образца, для проведения дальнейших измерений на образце вырезают плоскости, ориентированные вдоль выявленных элементов.

Как пример, на рис.5.4 линией  $abc$  показана плоскость, образованная элементами  $a'c'$ ,  $a'b'$ ,  $b'c'$ . Вырезание плоскостей, параллельных  $abc$ , а также перпендикулярных им производят таким образом, чтобы снова получить кубический образец или параллелепипед.

#### 5.4. Определение величин скорости распространения упругих колебаний

Необходимые измерения производят на образце, грани которого образованы параллельно и перпендикулярно выявленным элементам симметрии, рис.5.5. Совмещенный измеритель скорости распространения продольных и сдвиговых колебаний, рис.4.13, позволяет выполнить такие измерения наиболее точно и производительнее.

Перед проведением измерений образец помещается между преобразователями, совмещая его центр с центром контактных площадок. При измерении  $V_s$  векторы поляризации преобразователей совмещают с проекцией элемента симметрии среды, нанесенной на грани. В процессе измерений определяют время прохождения продольных  $t_p$  и сдвиговых,  $t_{s1}$ ,  $t_{s2}$  колебаний в образце. Для повышения достоверности определения точки первого вступления сдвиговых колебаний, следует поворачивать верхний преобразователь на некоторый угол от положения совпадения его ВПО (вектора поляризации) с ВПО нижнего преобразователя. Все полупериоды, принадлежащие искомому импульсу, изменяют синхронно свою амплитуду, а в точке первого вступления наблюдается перелом фазы колебаний. В том случае, если разница между  $t_{s1}$  и  $t_{s2}$  настолько мала, что она сравнима с ценой деления измерительного прибора, определяют лишь  $t_{s1}$ .

Скорости распространения продольных и сдвиговых  $V_{p,s}$  колебаний вычисляют по обычным формулам

$$V_{p,s} = l/(t_{p,s} - t_d), \quad (5.3)$$

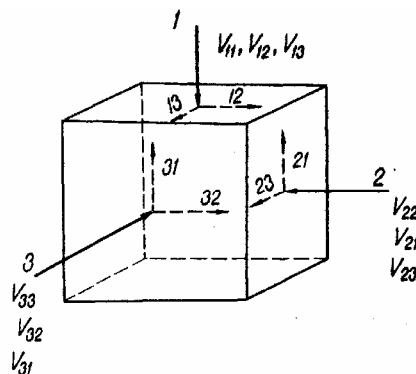


Рис.5.5. Индексация величин скорости распространения упругих колебаний в кубическом образце.



где  $l$  - расстояние между преобразователями по линии прозвучивания, мм;  $t_{p,s}$  - время распространения импульса волны от излучателя до приемника, мкс;  $t_d$  - время задержки импульса в цепях прибора и преобразователях, мкс.

Если, ввиду малой разности между  $t_{s1}$  и  $t_{s2}$ , определены лишь  $t_{s1}$  и  $V_{s1}$ , расчет  $V_{s2}$  производят по следующей формуле, полученной из (1.7):

$$V_{s2} = (360f_0 l V_{s1}) / (360f_0 l + \delta V_{s1}), \quad (5.4)$$

где  $f_0$  - частота собственных колебаний преобразователей, Гц;  $l$  - длина образца, м;  $V_{s1}$  - м/с;  $\delta$  - разность фазы, град., рассчитывается по формуле (1.17).

При этом следует помнить, что формула (1.17) дает ряд значений углов:  $\delta$ ,  $2\pi - \delta$ ,  $4\pi - \delta$  и так далее. При наличии ЛААП эта формула дает пониженные значения  $\delta$ . Обычно, для расчета величины  $\delta$  берут значения  $A_{BCM}$ , отн. ед., в точках, составляющих угол  $n\pi/4$  с ориентацией элементов симметрии среды.

После окончания измерения всех значений скорости распространения продольных и сдвиговых колебаний по всем граням кубического образца удобно использовать порядок индексации измеряемых величин, приведенный ниже:

$$\begin{matrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} \end{matrix} \quad (5.5)$$

где  $V_{11}$  - скорость распространения продольных колебаний, измеренная в направлении 1-1';  $V_{22}$  - та же, в направлении 2-2';  $V_{33}$  - та же, в направлении 3-3';  $V_{12}$  - скорость распространения сдвиговых колебаний, измеренная в направлении 1-1' при ориентировке ВПО в направлении 2-2';  $V_{13}$  - та же, в направлении 1-1' при ВПО в направлении 3-3'. Аналогично обозначают  $V_{21}$ ,  $V_{23}$ ,  $V_{31}$ ,  $V_{32}$ . Измеренные величины  $V_{ij}$  представляют в виде прямоугольной таблицы (квазиматрицы). Как будет показано далее, форма (5.5) представления результатов удобна для анализа типа упругой симметрии среды.

Таким образом, изложенный выше порядок или система проведения измерений позволяет выявить:

число элементов симметрии в любом из сечений образца, их взаимное расположение, определить наличие анизотропии;

пространственное положение элементов симметрии среды, в том числе их азимут и угол падения в ориентированном по странам света образце;

наличие линейной акустической анизотропии поглощения и других эффектов;

Изложенный порядок позволяет выполнить определения величин скорости распространения продольных и поперечных колебаний в направлениях, совпадающих с ориентацией элементов упругой симметрии. Он также позволяет выполнить такие определения в направлениях с определенным углом к ориентации этих элементов. При этом результаты измерений могут быть представлены в удобной, для анализа системы упругой симметрии, форме.

По нашему мнению, метод акустополярископии, как радиально-лучевой метод прозвучивания объекта исследований, может быть применен не только к образцам. Предложенный совместно с Н.В.Шаровым способ сейсмической разведки геологического объекта (Горбачевич, Шаров, 1988) создает предпосылки для перенесения изложенных выше принципов акустополярископии на сравнительно протяженные массивы. Данный способ позволит сократить расходы на проведение крупномасштабных определений параметров анизотропии массивов в пределах верхней части земной коры и мантии, заменив предлагаемым способом азимутальный метод (Raitt, et al., 1969; Марков, 1977). Нам представляется также, что метод акустополярископии получит применение при решении некоторых задач кристаллофизики и, в особенности, при разработке новых композиционных, металлокерамических и иных материалов будущего.

## **6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА СИММЕТРИИ И КОНСТАНТ УПРУГОСТИ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД**

### **6.1. Способы определения типа симметрии среды и констант упругости**

Как известно, тип симметрии среды определяется числом элементов симметрии, их видом (ось, плоскость) и взаимным расположением (Берри и др., 1987). Существует несколько способов (Tillman and Bennet, 1973; Продайвода, 1978; Harder, 1988), позволяющие по данным измерений величин фазовой скорости распространения упругих колебаний в нескольких взаимно неэквивалентных направлениях выполнить анализ системы упругой симметрии.

Как было отмечено во введении, анизотропные среды описываются триклинной, моноклинной, ромбической, тетрагональной, тригональной, гексагональной и кубической системами упругой симметрии. При расчете констант упругости минералов, как правило, для определения числа и направленности их элементов упругой симметрии используются оптические, рентгено-структурные методы, нейтронного просвечивания и др. (Беликов и др., 1970; Адамеску и др., 1985; Александров, Продайвода, 2000). Расчет констант выполняется путем использования величин скорости распространения упругих колебаний в определенных направлениях кристалла (Voigt, 1910). В некоторых случаях для расчета использовали показатели деформируемости кристалла (Беликов и др., 1970). Например, для определения упругих и пьезоэлектрических постоянных ромбических кристаллов акустическим методом требуется 4 образца, выпиленных под разными углами к кристаллографическим осям (Богданов, 1997). Экспериментальное определение всех упругих констант минерала низкой сингонии представляет собой длительный и трудоемкий процесс, включающий последовательное применение разных методов и требующий нескольких образцов различной формы. Наиболее полная сводка констант упругости минералов содержится в работах (Беликов и др., 1970; Александров, Продайвода, 2000). Однако для многих минералов полный набор констант упругости пока еще не определен.

Для определения упругих свойств горных пород разработаны иные подходы. Как было показано ранее, горные породы представляют собой поликристаллические, а чаще всего полиминеральные образования, упругие свойства которых являются результатом взаимодействия фактически неопределимого числа зерен (Voigt, 1910; Hill, 1952). Каждое из этих зерен обладает своим типом упругой симметрии и, соответственно, своим набором констант упругости. К тому же, чаще всего, каждое из зерен ограничено поверхностью очень сложной формы. По этой поверхности осуществляется контакт одного зерна с другим. Однако эти контакты редко бывают сплошными. В кристаллических

породах контакты зерен между собой перемежаются с микротрещинами, возникающими при остывании излившейся породы, при метаморфических преобразованиях, деформациях и др. Ввиду очень большого, фактически неопределенного числа факторов, определяющих упругость кристаллической породы, расчет ее констант упругости может быть выполнен лишь усредненно (Voigt, 1910; Hill, 1952; Беликов и др., 1970). По этим причинам, в целом, система упругой симметрии поликристаллических образований выше, чем минералов, ее слагающих (Адамеску и др., 1985; Архейский..., 1991).

Если, например, горная порода состоит из минеральных зерен триклинной, моноклинной сингоний, ориентировка осей которых, в среднем, детерминирована, то это определяет наличие упругой анизотропии. Однако направленность таких осей имеет, как правило, некоторую долю статистического разброса. В этом случае система симметрии породы будет выше системы симметрии минералов. Поэтому, в подавляющем числе кристаллические породы будут характеризоваться типами симметрии, - ромбической, тетрагональной, гексагональной, кубической и изотропной. Это подтверждается известными экспериментальными данными (Невский, 1974; Продайвода, 1980; Егоркина, Безгодков, 1987; Hess, 1964; Tien-When Lo et al., 1986; Chandra et al., 1988), а также результатами косвенной оценки, полученными с помощью микроструктурного анализа (Добржинецкая, 1978; Кожевников, 1982).

В итоге краткого обзора можно заключить, что упругие свойства кристаллических пород имеют как детерминированную, так и статистическую составляющие (Продайвода, 1991). Соотношение их долей подлежит определению для каждой конкретной породы, отобранной в каждом конкретном месте. В большинстве, тип упругой симметрии метаморфизованных кристаллических пород, по нашему мнению, может быть не ниже орторомбического. Это соображение исходит из того, что чаще всего фактором, формирующим упругую анизотропию породы, является тензор напряжений, в особенности, если эти напряжения действуют в земной коре в течение длительного (геологического) времени.

Особое достоинство метода акустополярископии состоит в том, что он позволяет производить определение типа симметрии анизотропного тела еще до стадии измерений скорости распространения упругих колебаний. Измерения скорости, выполняемые на втором этапе определений, производятся в направлениях, согласованных с ориентацией выявленных при помощи акустополярископии элементов упругой симметрии. Результаты определений величин скорости записанные в форме квазиматрицы  $V_{ij}$  (5.5) позволяют получить дополнительную информацию относительно типа симметрии твердого тела. Вначале тип симметрии определяется по числу и взаимным углам проекций элементов

упругой симметрии в каждом из взаимноперпендикулярных направлений в образце. Дополнительным признаком отличия поперечно-изотропного типа симметрии служит получение акустополяриграммы ВП в форме круга на одной из граней образца. Анализ величин скорости по их соотношениям в квазиматрице  $V_{ij}$  дает возможность (см. Акустополяриметрия..., 1990) проверить вывод относительно определяемого типа симметрии.

## 6.2. Анализ положения элементов симметрии в средах ромбической симметрии

Рассмотрим модель среды ромбической симметрии, состоящей из двух систем тонких параллельных слоев. Системы слоев перпендикулярны друг другу так, как это показано на рис.6.1.

Допустим, что слои, лежащие в плоскости, через которую проходят направления 1, 2, являются более высокоскоростными, а в плоскости, проходящей через 1, 3, - более низкоскоростными. Соответственно, плоскость 1, 2 назовем плоскостью более сильной анизотропии, а плоскость 1, 3 - более слабой.

Из схемы, рис.6.1, легко сделать вывод, что величины скорости распространения продольных волн, рис.5.5, будут подчиняться системе неравенств  $V_{11} > V_{22} > V_{33}$ . Направляя, например, пучок сдвиговых колебаний в направлении 1 с вектором поляризации, ориентированным вдоль направления 2 мы должны зарегистрировать самую большую величину сдвиговой скорости  $V_{12} = V_{21}$ . Промежуточная по величине будет скорость  $V_{13} = V_{31}$ . Наименьшая сдвиговая скорость  $V_{23} = V_{32}$  будет зарегистрирована вдоль направления 2 и 3 при, соответственно, ориентированном векторе поляризации вдоль направления 3 и 2. В целом, для среды, рис.6.1, можно сформулировать следующий ряд неравенств:

$$V_{11} > V_{22} > V_{33}, V_{12} = V_{21} > V_{13} = V_{31} > V_{23} = V_{32}. \quad (6.1)$$

Соотношения (6.1) представляют лишь один вариант ориентировки элементов упругой симметрии ромбической среды. Если в результате

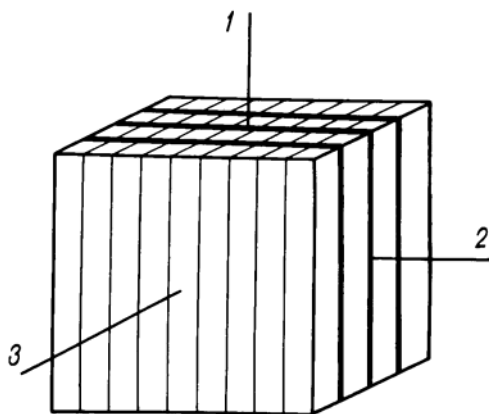


Рис.6.1. Модель тонкослоистой среды, составленной из взаимно перпендикулярных систем однородных изотропных слоев с отличающимися упругими характеристиками

измерений будут выявлены иные неравенства между величинами  $V_{ij}$ , то пространственное положение плоскостей более сильной и более слабой анизотропии будет другим (Горбачевич, 1995).

Из соотношений (6.1) легко вывести системы неравенств для величин скорости в поперечно-изотропных средах. Для среды, состоящей из плоско-параллельных слоев, рис. 6.2, ось симметрии будет совпадать с направлением 3. Как известно, в направлении оси симметрии такой среды будет наблюдаться наименьшая величина скорости распространения продольной волны. В целом, величины скорости будут подчиняться следующим соотношениям:

$$V_{11} = V_{22} > V_{33}, V_{12} = V_{21} = V_{13} = V_{31} > V_{23} = V_{32}. \quad (6.2)$$

Следует иметь в виду, что может наблюдаться иной вид поперечно-изотропной среды. Он представлен системой изометричных, параллельных друг другу стержней, пронизывающих однородный материал, рис.6.3.

В этом случае наибольшая скорость распространения продольной волны будет наблюдаться по направлению, совпадающему с направлением осей стержней. В этом же направлении будет проходить ось симметрии среды. Для такой среды система неравенств будет выглядеть следующим образом:

$$V_{11} = V_{22} < V_{33}, V_{12} = V_{21} < V_{13} = V_{31} = V_{23} = V_{32}. \quad (6.3)$$

Этот тип поперечно-изотропной симметрии наблюдался в амфибол-

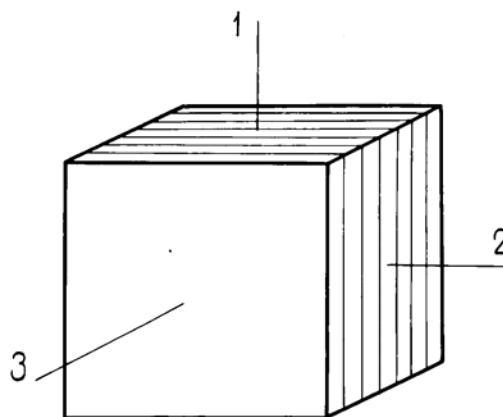


Рис.6.2. Модель тонкослоистой среды, составленной из однородных изотропных параллельных слоев с отличающимися упругими характеристиками.

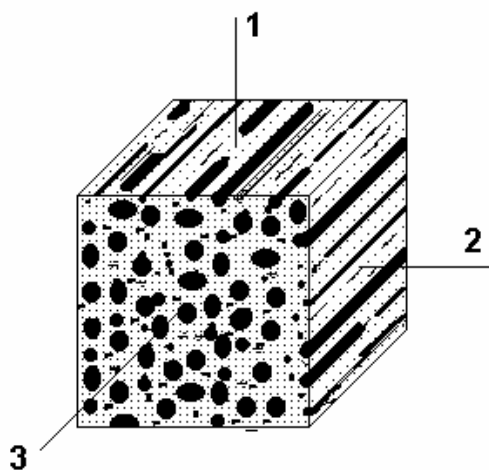


Рис.6.3. Модель среды, составленной из системы квазиизометричных, параллельных друг другу стержней, пронизывающих однородный материал.

содержащих породах по разрезу Кольской сверхглубокой скважины в интервале глубин 6.6-7.7 км (Горбацевич, 1995). Вероятно, такой тип симметрии возникает в результате метасоматических процессов.

Соотношения (6.1)-(6.3) позволяют, по результатам измерений, произвести определение пространственного положения элементов орторомбической и поперечно-изотропной сред. Результаты акустополярископии должны показывать наличие упругой анизотропии по всем трем парам граней в образце орторомбической симметрии и по двум парам граней – в образце поперечно-изотропной симметрии. Следует заметить, что соотношения (6.2, 6.3) для сред поперечно-изотропной и (6.1) для сред ромбической симметрии должны строго соблюдаться для однородных, мелкозернистых разновидностей горных пород. Для существенно неоднородных или крупнозернистых пород соотношения между величинами скорости распространения упругих колебаний будут отражать естественный разброс их упругих характеристик.

Как следует из вышеприведенного, определение типа симметрии среды описываемым методом осуществляется двумя независимыми путями: при помощи анализа акустополариграмм и по соотношениям величин скорости в квазиматрице  $V_{ij}$  (5.5).

После определения числа и вида элементов симметрии, их положения, соответствующей их переориентировки, на образце могут быть образованы 3 дополнительные, параллельные друг другу площадки, через которые измеряют величины  $V_{102}$ ,  $V_{103}$ ,  $V_{203}$ , рис.6.4.

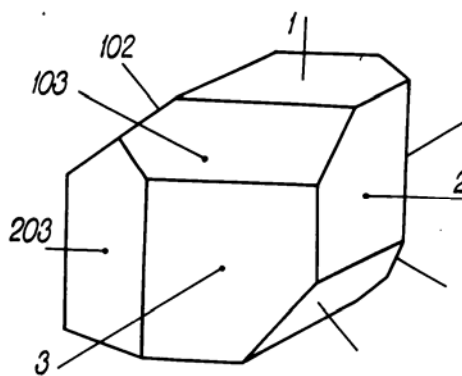


Рис. 6.4. Образец для определения констант упругости ортотропной среды (неправильный додекаэдр).

Последние, совместно с величинами, входящими в квазиматрицу  $V_{ij}$ , величиной плотности породы  $\rho$ , необходимы и достаточны для определения полного набора констант упругости орторомбических сред и сред более высоких типов симметрий.

### 6.3. Расчет констант упругости орторомбических сред и сред более высоких типов симметрии.

Рассмотрим, в качестве исходной, среду орторомбической симметрии, так как из системы уравнений для вычисления констант упругости среды этой симметрии, при наличии некоторых равенств,

можно определить константы тетрагональной, гексагональной и других типов. Орторомбической системе упругой симметрии отвечает набор из 9 независимых констант или постоянных (Беликов и др., 1970):

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix}. \quad (6.4)$$

В этой матрице  $C_{12} = C_{21}$ ,  $C_{13} = C_{31}$ ,  $C_{23} = C_{32}$ , а сама матрица содержит только 9 независимых констант.

Определив все 9 констант упругой жесткости  $C_{\alpha\beta}$  среды ромбической симметрии, используя известные соотношения (Беликов и др., 1970; Горбачевич, 1995), можно рассчитать величины упругой податливости  $S_{\alpha\beta}$  или технические модули.

Расчет констант  $C_{\alpha\beta}$  среды ромбической симметрии можно выполнить, используя следующие уравнения (Урупов, Лапин, 1972; Невский, 1974):

$$\begin{aligned} C_{11} &= \rho(V_{11})^2, & C_{22} &= \rho(V_{22})^2, & C_{33} &= \rho(V_{33})^2, \\ C_{44} &= \rho(V_{23})^2, & C_{55} &= \rho(V_{13})^2, & C_{66} &= \rho(V_{12})^2. \end{aligned} \quad (6.5)$$

Причем среди величин  $V_{ij}$  должно соблюдаться неравенство  $V_{11} > V_{22} > V_{33}$ .

Константу  $C_{12}$  можно рассчитать из выражения (Урупов, Лапин, 1972):

$$C_{12} = \frac{1}{\sin 2\theta_1} \sqrt{F_1^2 - F_2^2} - C_{66}, \quad (6.6)$$

где  $F_1 = 2\rho V_{102}^2 - (C_{22} + C_{66}) - (C_{11} - C_{22}) \sin^2 \theta_1$ ,

$F_2 = C_{22} - C_{66} - \sin^2 \theta_1 (C_{11} + C_{22} - 2C_{66})$ .

В последних выражениях  $\theta_1$  представляет собой угол между нормалью к фронту равных фаз и плоскостью более слабой анизотропии ортотропной среды. Отчет угла  $\theta_1$  производят от направления, в котором измерена  $V_{22}$  вдоль плоскости более сильной анизотропии, проходящей через направления, в которых измерены величины  $V_{11}$  и  $V_{22}$ .

Если угол  $\theta_1$  в точности равен  $45^\circ$ , то уравнение (6.6) выглядит более компактно:



$$C_{12} = \sqrt{\left[2\rho V_{102}^2 - \frac{1}{2}(C_{11} + C_{22}) - C_{66}\right]^2 - \frac{1}{4}(C_{11} - C_{22})^2} - C_{66}. \quad (6.7)$$

Для определения  $C_{13}$  может быть использована формула (Урупов, Лапин, 1972):

$$C_{13} = \frac{1}{\sin 2\theta_2} \sqrt{F_1^2 - F_2^2} - C_{55}, \quad (6.8)$$

где  $F_1 = 2\rho V_{103}^2 - (C_{33} + C_{55}) - (C_{11} - C_{33})\sin^2 \theta_2$ ,

$$F_2 = C_{33} - C_{55} - \sin^2 \theta_2 (C_{11} + C_{33} - 2C_{55}).$$

Угол  $\theta_2$  отсчитывается от направления, в котором измерена величина  $V_{33}$  в плоскости более слабой анизотропии, проходящей через направления, в которых измерены  $V_{11}$  и  $V_{33}$ . При  $\theta_1 = 45^\circ$  уравнение (6.8):

$$C_{13} = \sqrt{\left[2\rho V_{103}^2 - \frac{1}{2}(C_{11} + C_{33}) - C_{55}\right]^2 - \frac{1}{4}(C_{11} - C_{33})^2} - C_{55}, \quad (6.9)$$

Для определения константы  $C_{23}$  можно использовать формулу (Урупов, Лапин, 1972):

$$C_{23} = \frac{1}{\sin 2\theta_3} \sqrt{F_1^2 - F_2^2} - C_{44}, \quad (6.10)$$

где  $F_1 = 2\rho V_{203}^2 - (C_{33} + C_{44}) - (C_{22} - C_{33})\sin^2 \theta_3$ ,

$$F_2 = C_{33} - C_{44} - \sin^2 \theta_3 (C_{22} + C_{33} - 2C_{44}).$$

Угол  $\theta_3$  отсчитывается от направления, в котором измерена величина  $V_{33}$  в плоскости более слабой анизотропии, проходящей через направления, в которых измерены  $V_{22}$  и  $V_{33}$ .

Как следует из формул (6.5-6.10), для расчета всех 9 констант среды ромбической симметрии дополнительно к величинам  $V_{ij}$ , приведенным в форме матрицы (5.5), необходимо определить величины фазовой скорости распространения продольных колебаний  $V_{102}$ ,  $V_{103}$ ,  $V_{203}$  в направлениях, которые составляют углы  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  к плоскостям слабой и сильной симметрии. Величины  $V_{102}$ ,  $V_{103}$ ,  $V_{203}$  можно определить, если на образце, рис. 5.5, дополнительно образовать 3 параллельные друг другу площадки таким образом, чтобы нормали к ним составили направления (102), (103) и (203) так, как это показано на рис.6.4. Расчеты  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{23}$  в значительной степени упрощаются, если направления (102), (103), (203)

будут составлять, соответственно, углы  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 45^\circ$  к элементам симметрии среды.

Измерения  $V_{102}$ ,  $V_{103}$ ,  $V_{203}$  следует выполнять, учитывая требования, изложенные в главах 4, 6, т.е. таким образом, чтобы была измерена именно фазовая скорость распространения фронта волны. Следует также учитывать, что заранее неизвестно, как располагаются в образце элементы упругой симметрии и, в частности, плоскости более слабой и более сильной симметрии. Однако, как показано выше, для расчета констант  $C_{\alpha\beta}$  необходимо знать расположение элементов упругой симметрии среды относительно граней или направлений в образце. Поэтому для определения типа элементов упругой симметрии среды необходимо применить приемы анализа акустопляриграмм и матриц  $V_{ij}$  (5.5). Задача подобного анализа состоит в разделении сред ромбической, тетрагональной, гексагональной, кубической симметрий (Горбачевич, 1995).

Анализируемая среда принадлежит к орторомбической системе лишь в том случае, когда все 9 постоянных представлены вещественными, не равными нулю и не равными друг другу величинами. Однако в результате расчетов может быть выявлено равенство или обнаружена зависимость между отдельными константами.

Определенный вид таких неравенств или соотношений позволяет диагностировать другие, более простые (высшие) системы упругой симметрии.

Если константы  $C_{11} = C_{22}$ ,  $C_{44} = C_{55}$ ,  $C_{13} = C_{23}$ , но  $C_{33}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{66}$  не равны друг другу, среда имеет тетрагональную симметрию (классы симметрии  $422$ ,  $4mm$ ,  $4/mmm$ ,  $4\bar{2}m$ ). Полное число независимых констант равно 6.

Если константы  $C_{11} = C_{22}$ ,  $C_{13} = C_{23}$ ,  $C_{44} = C_{55}$ ,  $C_{12} = C_{11} - 2C_{66}$  не равны друг другу, среда является поперечно-изотропной. Число независимых констант равно 5.

Если  $C_{11} = C_{22} = C_{33}$ ,  $C_{44} = C_{55} = C_{66}$ ,  $C_{12} = C_{13} = C_{23}$ , то среда представляет кубическую симметрию. Число констант равно 3.

Если  $C_{11} = C_{22} = C_{33}$ ,  $C_{44} = C_{55} = C_{66} = (C_{11} - C_{12})/2$ ,  $C_{12} = C_{13} = C_{23}$ , то среда является изотропной. Число независимых констант равно 2.

Константы упругости (жесткости)  $C_{\alpha\beta}$  можно пересчитать в показатели податливости  $S_{\alpha\beta}$  или технические константы, используя формулы, приведенные в работе (Горбачевич, 1995).

Упругая симметрия кристаллических горных пород, вероятно, не исчерпывается перечисленными выше системами. Более сложные (низкосимметричные) среды, чем орторомбическая, описываются числом упругих постоянных, большим девяти. Способ их определения, ввиду сложных соотношений между величинами скорости распространения упругих колебаний и константами упругости, пока не разработан. На

принадлежность горной породы к сложным системам (тригональной, моноклинной, тетрагональной) может указывать обнаружение при акустополярископии в каком-либо сечении среды более чем двух элементов симметрии, их неортогональности. Подбор класса упругой симметрии таких сред может быть выполнен путем поиска аналогии с соответствующим классом симметрии кристаллов. Пример, указывающий на такую возможность, приведен на рис.6.5.

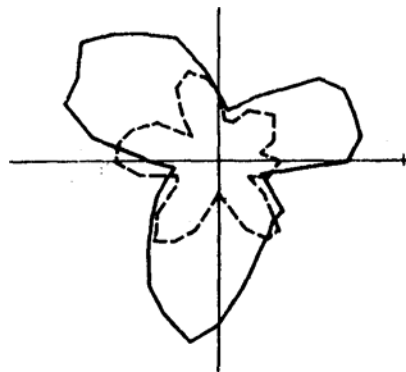


Рис. 6.5. Акустополяри-грамма монокристалла кварца (тригональная сингония), полученная в сечении, перпендикулярном оси третьего порядка.

Следует учитывать, что в неоднородных, поглощающих упругие колебания поликристаллических горных породах величины скорости распространения упругих колебаний, как правило, экспериментально не могут быть точно определены, даже если применена измерительная аппаратура высокого класса. Этому способствуют, в первую очередь, неоднородности - вариации состава и строения такой среды. Причем, чем более низкий класс симметрии среды образца, тем выше неопределенность при расчете его констант. Поэтому представительность определений констант и класса упругой симметрии какой-либо геологической отдельности должна быть подтверждена параллельными измерениями на других образцах.

Как одни из сложных, в первую очередь рассмотрим особенности сред псевдогексагональной и ромбической симметрий.

#### 6.4. Критерии выделения слабоанизотропных сред

Большое число наблюдений, выполненных на образцах (Беликов и др., 1970; Справочник..., 1975; Физические..., 1988; Петрофизика, 1992), а также сейсмическими методами в протяженных геологических телах (Чесноков, 1977; Hess, 1964; Raitt et al., 1969) показали, что преобладают слабоанизотропные горные породы. В статье Л.Томсена (Thomsen, 1986), специально посвященной слабой анизотропии, приводятся данные о том, что среди осадочных пород слабоанизотропные, поперечно-изотропные среды встречаются чаще всего. В этой работе показано, что угловую зависимость величин  $V_p$ ,  $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$  нельзя описать функцией, представляющей сравнительно простую фигуру, например, эллипс. Специальный критерий, позволяющий разграничить среды на слабо и сильноанизотропные, был рассмотрен М.В.Невским (1974). При

прохождении упругих колебаний через тонкослоистые среды на круговой индикатриссе скорости распространения сдвиговых колебаний  $V_{sv}$  (с вектором поляризации, находящимся в плоскости, проходящей через ось симметрии) наблюдаются петли (лакуны), если максимальная величина  $V_{svmax}$  в какой-либо точке индикатриссы превысит в 1.13-1.14 раза величину  $V_{sv}$ , измеренную в направлении слоев. Наличие петель означает, что в одном и том же направлении могут быть зарегистрированы 4 различающихся скорости распространения сдвиговых колебаний, причем только в одной из них вектор поляризации лежит в плоскости симметрии среды. М.Масгрейв и М.Маркхам наблюдали подобное расщепление импульса сдвиговых колебаний в кристаллах цинка (Musgrave and Markham, 1961). Отсутствие петель на круговых индикатриссах скорости распространения может служить одним из основных признаков слабоанизотропной среды.

Если соблюдены условия, определяющие принадлежность среды к поперечно-изотропной и слабоанизотропной, индикатриссы скорости распространения колебаний можно рассчитать с применением упрощенных уравнений, предложенных Л.Томсеном (Thomsen, 1986).

Согласно этой работе, среда является слабоанизотропной, если коэффициенты

$$\varepsilon = (V_{11} - V_{33})/V_{33} \leq 0.2, \gamma = (V_{23} - V_{12})/V_{12} \leq 0.2, \kappa = (V_{s102} - V_{12})/V_{12} \leq 0.12. \quad (6.11)$$

В последних неравенствах применена индексация, приведенная в матрице  $V_{ij}$  (5.5). Величина  $V_{s102}$  определяется в направлении 102, рис. 6.4, таким образом, чтобы вектор поляризации сдвиговых колебаний был ориентирован в плоскости, проходящей через ось симметрии среды.

В статье (Селезнев и др., 1986) также предлагается упрощенный способ расчета констант поперечно-изотропных сред. Критериями, позволяющими относить среду к слабоизотропной, являются неравенства, аналогичные вышеприведенным:  $\varepsilon \leq 0.13$ ,  $\gamma \leq 0.20$ ,  $\kappa \leq 0.13$ . Как показали тестовые примеры, применение упрощенного способа расчета при соблюдении вышеприведенных неравенств, может дать ошибку результата, не превышающую 3-4% (Селезнев, 1986; Thomsen, 1986).

Таким образом, обзор известных работ позволяет считать близкими к общепризнанным следующие критерии слабоанизотропности сред:

$$\varepsilon = (V_{11} - V_{33})/V_{33} \leq 0.15, \gamma = (V_{23} - V_{12})/V_{12} \leq 0.2, \kappa = (V_{s102} - V_{12})/V_{12} \leq 0.13. \quad (6.12)$$

Аналогичные критерии могут быть применены и к оценке анизотропности более сложных сред, чем поперечно-изотропные.

Например, для орторомбической среды число таких критериев возрастает до 9.

Помимо оценки степени слабоанизотропности показателями  $\varepsilon$ ,  $\gamma$ ,  $\kappa$ , возникает необходимость определения среднего коэффициента анизотропии, характеризующего степень анизотропии среды в целом.

### **6.5. Интегральная оценка упругой анизотропии кристаллических пород**

Предложенная нами форма записи величин скорости распространения упругих колебаний в виде квазиматрицы  $V_{ij}$  (5.5) включает 9 величин. Диагональные члены,  $V_{11}$ ,  $V_{22}$ ,  $V_{33}$  квазиматрицы представляют собой величины скорости распространения продольных колебаний, а члены  $V_{12}$ ,  $V_{13}$  - величины скорости распространения сдвиговых колебаний, измеренные на первой грани образца;  $V_{21}$ ,  $V_{23}$  - на второй;  $V_{31}$ ,  $V_{32}$  - на третьей. Если указанные величины определены вдоль элементов упругой симметрии образца, они принимают, соответственно наибольшие и наименьшие, т.е. экстремальные значения. Естественно, что сравнение, например,  $V_{11}$  и  $V_{22}$ , или  $V_{11}$  и  $V_{33}$  для определения показателя анизотропии породы в целом, явно недостаточно. Общий показатель упругой анизотропии породы по продольным волнам должен учитывать отличия всех величин  $V_{11}$ ,  $V_{22}$  и  $V_{33}$  друг от друга. Соответственно, обобщенный показатель анизотропии по измеренным величинам поперечных волн должен учитывать значения  $V_{12}$ ,  $V_{13}$ ,  $V_{21}$ ,  $V_{23}$ ,  $V_{31}$ ,  $V_{32}$ .

Рассмотрим вначале возможности представления обобщенного показателя анизотропии по продольным волнам через диагональные члены квазиматрицы (5.5), то есть через  $V_{11}$ ,  $V_{22}$ ,  $V_{33}$ .

В кристаллических, метаморфизованных горных породах, чаще всего, разница между членами  $V_{ii}$  обусловлена длительным действием палеонапряжений, приводящим к перестройке их минерального состава и структуры (Кожевников, 1982). Из теории упругости известно (Безухов, 1968), что сумма значений  $\sigma_{max} = \sigma_{11}$ ,  $\sigma_{cp} = \sigma_{22}$ ,  $\sigma_{min} = \sigma_{33}$  или иначе, сумма  $\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$  является инвариантом, т.е. не изменяется при пространственном повороте трех взаимноперпендикулярных направлений, вдоль которых они определяются. В соответствии с принятыми условиями пропорциональности замеренных значений скорости величинам палеонапряжений (2) и (3), сумму  $V_{11} + V_{22} + V_{33}$  также, с известными допущениями, можно считать инвариантной относительно взаимноперпендикулярных направлений, вдоль которых они определены. Такие определения можно выполнить, например, на кубическом образце. Выражение

$$V_{cp} = (V_{11} + V_{22} + V_{33})/3 \quad (6.13)$$

является средней величиной скорости распространения продольных колебаний в анизотропном образце. Величину  $V_{cp}$  можно считать эквивалентной шаровому тензору квазиматрицы (5.5). Используя величину  $V_{cp}$  можно ввести характеристику, которая отражает степень анизотропии образца в целом. Такая характеристика, назовем ее интенсивностью или обобщенным коэффициентом анизотропии по продольным колебаниям, может быть определена как сумма средних квадратичных отклонений индивидуальных значений  $V_{ii}$  от  $V_{cp}$ :

$$A_p = \frac{1}{V_{cp}} \sqrt{(V_{11} - V_{cp})^2 + (V_{22} - V_{cp})^2 + (V_{33} - V_{cp})^2}. \quad (6.14)$$

Оценка, выполненная по формуле (6.14) имеет еще и то значение, что она по форме совпадает с выражением девиатора для тензора напряжений в твердом теле и может быть инвариантной относительно изменения направлений координат (Безухов, 1968). Если предполагается применить обобщенный коэффициент анизотропии по отношению к константам упругости, то его следует преобразовать к виду

$$A_c = \frac{1}{V_{cp}^2} \sqrt{(V_{11}^2 - V_{cp}^2)^2 + (V_{22}^2 - V_{cp}^2)^2 + (V_{33}^2 - V_{cp}^2)^2}$$

В этом выражении коэффициента анизотропии  $A_c$  учитывается, что при расчете констант упругости величины скорости возводятся в квадрат, см. (6.5).

Коэффициенты анизотропии, отражающие отличие среды определенного типа симметрии от изотропного тела предложены в работе (Александров, Продайвода; 2000).

Теперь рассмотрим члены квазиматрицы (5.5), составленные из величин скоростей поперечных колебаний. Ранее было принято оценивать степень анизотропии по каждой из граней кубического образца как коэффициент двулучепреломления (Clark et al., 1983; Горбацевич, 1995). Например, коэффициент двулучепреломления поперечных колебаний, определенный по первой грани, равен,

$$B_1 = \frac{2(V_{12} - V_{13})}{(V_{12} + V_{13})}. \quad (6.15)$$

Аналогичным образом определяются коэффициенты по второй и третьей граням образца:

$$B_2 = \frac{2(V_{21} - V_{23})}{(V_{21} + V_{23})}, \quad (6.16)$$

$$B_3 = \frac{2(V_{31} - V_{32})}{(V_{31} + V_{32})}. \quad (6.17)$$

Определим обобщенный коэффициент по поперечным волнам как

$$B_S = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2}. \quad (6.18)$$

Следует отметить, что коэффициенты анизотропии  $A_p$  и  $B_S$  будут, для большого числа пород, скорее всего, оценочными ввиду того, что анизотропные кристаллические породы, как правило, неоднородны по своим упругим свойствам. Их степень неоднородности в каждом конкретном случае априори оценить невозможно. С другой стороны, строгий подход требует, чтобы направления, вдоль которых измеряются величины  $V_{ij}$ , были близки к направлениям, вдоль которых проходят элементы упругой симметрии. Для корректного использования выражений (6.14-6.18) необходимо, чтобы симметрия оцениваемой среды была не ниже орторомбической.

## **7. АКУСТОПОЛЯРИСКОПИЯ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ**

### **7.1. Особенности упругих свойств породообразующих минералов**

Как известно, в распоряжении минералогов имеется прекрасное по полноте приведенных данных об оптических свойствах минералов издание В.Е. Трегера (Трегер, 1968). В отношении упругих свойств минералов такого справочника пока еще не создано. По нашему мнению, причиной этому послужило недостаточное развитие экспериментальной техники. Значительные сложности при анализе результатов экспериментальных наблюдений создает то, что упругие свойства самых низкосимметричных минералов описываются тензором четвертого порядка. Известно, также, что оптические свойства минералов описываются тензором не выше второго порядка. Вместе с этим, упругие свойства породообразующих минералов оказывают очень большое влияние на ряд природных процессов. В связи с появлением нового метода исследований - акустополярископии (Горбацевич, 1995) возникла реальная возможность создать справочник, подобный книге В.Е. Трегера, который бы содержал сведения о тонких особенностях упругих свойств породообразующих минералов.

Исследование закономерностей формирования упруго-анизотропных свойств минералов и минеральных образований, а также неупругих эффектов, присущих им, представляет собой фундаментальную научную проблему. Эта проблема, в том числе, связана с проблемой термодинамического равновесия минерального зерна в парагенетическом ансамбле других зерен кристаллической горной породы в процессе метаморфических преобразований. Например, существующий метод динамического анализа направленности компонент поля палеонапряжений при метаморфических процессах основывается на изучении ориентированного расположения кристаллографических, а чаще оптических осей в минералах. Такова суть микроструктурного метода. На основе этого метода и других, в течение последнего времени установлено, что на ориентировку кристаллографических осей минеральных зерен наибольшее влияние оказывают их упруго-анизотропные свойства (Brace, 1960; Кожевников, 1982; Казаков, 1987). Их ориентировка подчиняется также принципу минимума свободной энергии, который является следствием теоремы об изменении термодинамического потенциала анизотропного тела в поле механических напряжений. Применительно к минеральным зернам полиминеральной породы он формулируется следующим образом: в сильнодеформированных породах в направлении наибольшей компоненты поля палеонапряжения оказывается направление, в котором величина константы податливости минерала максимальна (Делицын, 1985).



Имеются минералы (биотит, флогопит, мусковит и др.), для которых направленность осей кристаллографической и упругой симметрий очень близка или совпадает. Имеются другие минералы (кварц, кальцит, диопсид, амфибол, плагиоклаз и др.) направленность кристаллографических осей в которых может значительно расходиться с направлением осей упругой симметрии и, соответственно, с пространственным положением наибольшей (наименьшей) величины модуля упругости (Brace, 1960; Казаков, 1987; Александров, Продайвода, 2000). Более того, углы между направлениями, в которых величины  $S_{ij}$  ( $C_{ij}$ ) экстремальны и кристаллографическими осями зависят от модификации минерала, его состава. Например, для кварца разных модификаций ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) эти углы изменяются в пределах от  $\sim 30^\circ$  до  $\sim 70^\circ$  (Brace, 1960; Соболев и др., 1964). Эти же углы для амфиболов и плагиоклазов, как и характеристики упругости  $S_{ij}$ ,  $C_{ij}$ , зависят от их вещественного состава (Казаков, 1987).

В настоящее время сведений о направленности осей упругости, пространственного положения наибольших (наименьших) величин модуля упругости для большого числа порообразующих минералов явно недостаточно. Поэтому нами была выполнена акустополярископия некоторых, широко распространенных порообразующих минералов. Ниже приводятся некоторые первичные результаты этой работы. Конечно, это исследование ни коим образом не приблизилось к решению проблемы в той степени, в которой она решена в книге В.Е. Трегера в отношении оптических свойств минералов. Наше исследование – лишь начальный этап на этом пути.

## 7.2. Минералы высшей и средней сингоний

Как известно, сингонии минералов подразделяются на категории: высшая, средняя и низшая (Геологический словарь, 1973). Кубическая сингония принадлежит к высшей категории, обладающей наибольшим числом элементов упругой симметрии среди других однородных упорядоченных анизотропных сред. К анизотропным средам средней категории относятся гексагональная, тетрагональная и триклинная типы симметрий (см. Приложение 2).

Из сред кубической симметрии нами была произведена акустополярископия минералов анальцима, галита граната и пирита (рис.7.1, табл.7.1). Такие же определения были выполнены для группы минералов средней сингонии: апатита (гекс.), нефелина (гекс.), турмалина (триг.), и кварца (триг.), см. табл.7.2.

Вначале был произведен отбор образцов минералов соответствующего размера (не менее  $10 \times 10 \times 10$  мм<sup>3</sup>) и качества (отсутствие трещин, высокая однородность). Образцы изготавливались в

форме куба таким образом, чтобы главная кристаллографическая ось кристалла проходила бы в направлении 1-1', рис.5.1.

На первом этапе акустополярископию образцов проводили при параллельных векторах поляризации излучателя и приемника колебаний (положение ВП). На втором этапе векторы поляризации преобразователей устанавливали под прямым углом (положение ВС). Для некоторых образцов минералов акустополярископия выполнена на разных частотах. Соответственно, использовались акустополярископы, в которых были установлены преобразователи, имеющие собственные частоты 0.78, 1.26 и 2.67 МГц. Измерения выполняли на всех трех парах граней кубического образца. По каждой из трех граней измерены величины взаимных углов между проекциями элементов симметрии (табл.7.1). Затем производили определения показателя ЛААП  $D$  (табл.7.2).

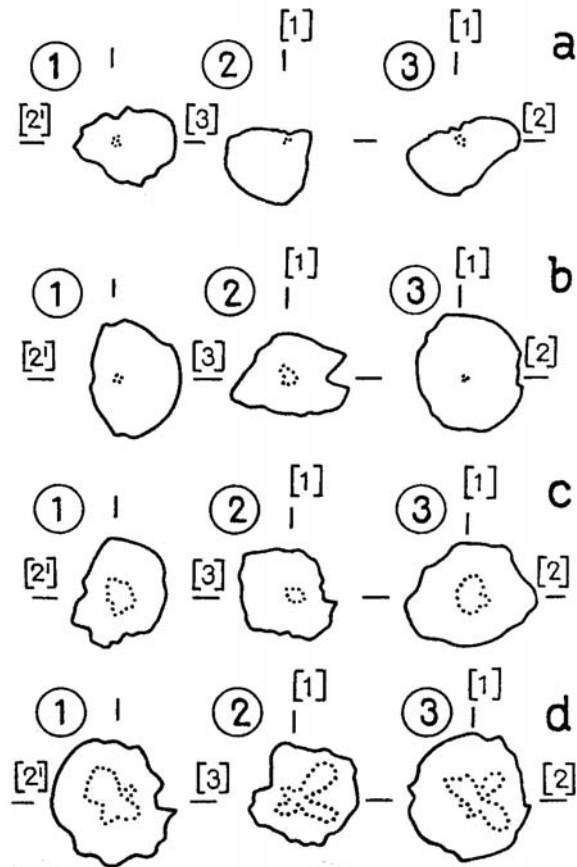


Рис.7.1. Акустополяриграммы образцов минералов анальцима (а), галита (б), граната (с) и пирита (д)

Обзор акустополяриграмм образцов минералов кубической сингонии, рис.7.1, показывает, что на форму диаграмм ВП сравнительно сильно влияют внутренние дефекты кристалла.

Диаграммы ВС пирита, рис.7.1d, позволяют выделить направления проекций элементов симметрии на всех трех гранях образца. На образцах других минералов, рис.7.1, выделение подобных направлений представляет, ввиду малого размера диаграмм ВС, определенные трудности. Однако это может быть сделано, если такое определение выполнить по так называемым обратным акустополяриграммам, рис.7.2. Обратные акустополяриграммы можно получить, если нормирование всех амплитуд при акустополяризационных измерениях произвести на

минимальную амплитуду, полученную при скрещенных векторах поляризации источника и приемника сдвиговых колебаний. На гранях 1 и 2 образца анальцима направления проекций элементов симметрии, проходящие через максимумы амплитуд обратных диаграмм, сравнительно легко выделяются, рис.7.2а.

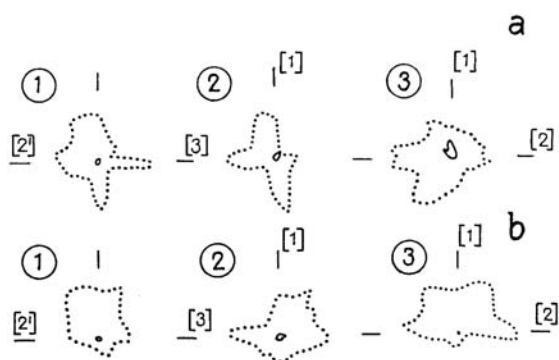


Рис.7.2. Примеры обратных акустополаризационных диаграмм образцов анальцима (а) и галита (б)

Измерения углов между проекциями элементов симметрии, представленные в табл.7.1, выполнены по обратным акустополаризационным диаграммам. Эти углы, например, для анальцима на частотах  $f_0 = 1.67$  и  $2.67$  МГц являются средними из двух измерений. Углы для пирита, представленные в табл.7.1, являются средними из трех опытов. Направленность элементов упругой симметрии среды пирита сравнительно легко может быть определена и по диаграммам ВП, рис.7.1d. Отсутствие данных в некоторых ячейках табл.7.1 или их недостаточная точность объясняется наличием неоднородностей и посторонними включениями в структуре образцов природных минералов.

Табл.7.1

Взаимные углы между проекциями элементов упругой симметрии в образцах некоторых порообразующих минералов высших сингоний

№	№	Наименование минерала	Номер образца	Сингония	Номер опыта	Частота, МГц	Грань 1		Грань 2		Грань 3	
							$\alpha_1$ , гр.	$\alpha_2$ , гр.	$\alpha_1$ , гр.	$\alpha_2$ , гр.	$\alpha_1$ , гр.	$\alpha_2$ , гр.
1		Анальцим	Ап-98-1	Куб.	1, 2	1.26	80	100	115	~65	85	95
2		Анальцим	Ап-98-1	Куб.	1, 2	2.67	~107	~73	100	~80	~93	~87
3		Галит	Ga-1-5	Куб.	1	2.67	~95	~85	~73	107	104	76
4		Гранат	G-1	Куб.	1	1.26	-	-	~90	~90	-	-
5		Пирит	P-001	Куб.	1	0.78	79	101	99	81	-	-
6		Пирит	P-001	Куб.	1-3	2.67	82	98	92	88	86	94

Для всех образцов кубической сингонии, представленных в табл.7.2, проявления эффекта ЛААП сравнительно малы. Показатель  $D$  в анальциме возрастает, в среднем, с ростом частоты воздействия.

Табл. 7.2.

Показатели линейной акустической анизотропии поглощения в образцах некоторых породообразующих минералов кубической симметрии

№ №	Наименование минерала	Номер образца	Сингония	Номер опыта	Частота, МГц	$D_1$	$D_2$	$D_3$	Примечания
1	Анальцит	An-98-1	Куб.	1, 2	1.26	0.10	0.055	0.074	
2	Анальцит	An-98-1	Куб.	1, 2	2.67	0.06	0.022	0.30	P2-3
3	Галит	Ga-1-5	Куб.	1	2.67	0.21	0.18	0.070	
4	Гранат	G-1	Куб.	1	1.26	0.13	0.11	0.13	
5	Пирит	P-001	Куб	1	0.78	0.14	0.076	0.048	
6	Пирит	P-001	Куб	1, 2	2.67	0.06	0.043	0.030	

Примечание: P2-3 – плоскость структурных элементов ЛААП проходит через направления 2-2' и 3-3', см. рис.5.1

При частоте  $f_0 = 2.67$  МГц образце фиксируется плоскостной тип ЛААП (см.п.2.4). В пирите проявления ЛААП незначительны и, скорее всего, объясняются несовершенством структуры кристалла.

Результаты определений на минералах средней категории сингоний: кристаллах апатита, нефелина, кварца и турмалина представлены на рис.7.3-7.6 и в табл.7.3, 7.4.

Кристалл апатита был отобран из скарнов Дашкесанского железорудного месторождения. Он представлял собой хорошо огранный кристалл, образованный комбинацией двух гексагональных призм, гексагональных пирамид и пинакоида. В направлениях, параллельных граням (0001) и (1010), в кристалле зафиксированы слабые волосовидные микротрещинки несовершенной спайности. Образец, подготовленный для акустополарископии, был вырезан из

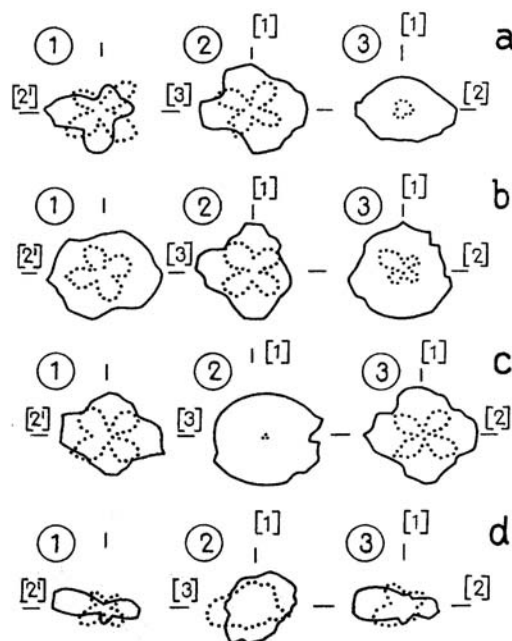


Рис.7.3. Примеры акустополариграмм образцов минералов: апатита при частоте 1.26 МГц (а), апатита при частоте 2.67 МГц (б), нефелина (с), турмалина (д).

центральной части кристалла в виде прямоугольной призмы с основанием 12x12 мм и ребром 15 мм, ориентированным параллельно кристаллографической оси  $L_6$  в апатите.

Акустополярископия образцов апатита выполнена несколько раз и на разных частотах, табл.7.3, 7.4, рис.7.3, 7.4. Диаграмма образца А-1 по первой грани получена в направлении оси  $[0001]$ , рис.7.3а. Как следует из обратных акустополяриграмм, рис.7.4, проекции элементов упругой симметрии находятся под прямым углом друг к другу и практически перпендикулярно к граням образца. В направлении 3-3', рис.7.4а, полученной при частоте 1.26 МГц, проекции элементов упругой симметрии практически не выделяются. Однако для образца А-1-3, диаграммы которого получены при частоте 2.67 МГц, рис.7.3б, выявить направленность проекций элементов упругой симметрии не представляет труда. Сравнение рис.7.3а, 7.3б позволяет заметить, что диаграммы ВС, особенно по грани 3 при более высокой частоте позволяют легче выделить направления элементов симметрии. На частоте 2.67 МГц образец апатита проявляет орторомбический тип симметрии. Анализ данных табл.7.3 позволяет заметить, что величины углов между проекциями элементов упругой симметрии изменяются в пределах  $81-99^\circ$ , в тех случаях, когда их направленность уверенно выявляется. Какой либо зависимости этих углов от частоты не отмечено.

В образцах апатита, табл.7.4, существенного проявления эффекта ЛААП не зарегистрировано. Максимальные величины  $D$  не превышают 0.14. На частоте  $f_0 = 1.26$  МГц в образце А-1 фиксируется линейный тип проявления ЛААП (L2), как и на частоте  $f_0 = 2.67$  МГц в образце А-1-3 (L1).

Образец нефелина (Не-005,  $f_0 = 2.67$  МГц), акустополяриграммы которого представлены на рис.7.3с, практически представляет собой поперечно-изотропную среду. Ее ось симметрии проходит по нормали к грани 2. На гранях 1 и 3 обратная акустополяриграмма позволяет четко выделить проекции

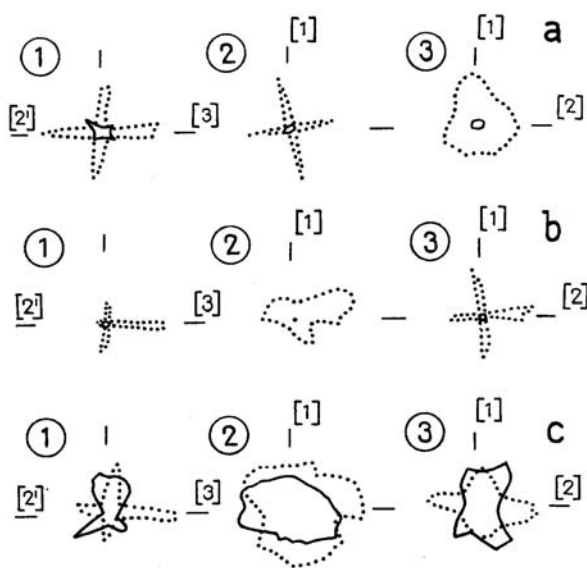


Рис.7.4. Примеры обратных акустополяриграмм образцов апатита (а), нефелина (б), и турмалина (с)

элементов упругой симметрии, рис.7.4b. Взаимные углы между элементами упругой симметрии в образцах нефелина находятся в пределах  $85-95^{\circ}$ , табл.7.3.

В образцах нефелина, табл.7.4, при низких частотах ( $f_0 = 0.78-1.26$  МГц) показатель эффекта ЛААП может достигать средних и больших величин. Например, максимальные величины  $D$  составляют  $0.25-0.62$ .

Табл.7.3

Взаимные углы между проекциями элементов упругой симметрии в образцах некоторых пороодообразующих минералов средних сингоний

№ №	Наименование минерала	Номер образца	Сингония	Номер опыта	Частота, МГц	Грань 1		Грань 2		Грань 3	
						$\alpha_1$ , гр.	$\alpha_2$ , гр.	$\alpha_1$ , гр.	$\alpha_2$ , гр.	$\alpha_1$ , гр.	$\alpha_2$ , гр.
1	Апатит	А-1	Гекс.	1, 2	1.26	85	95	90	90	91	89
2	Апатит	А-1	Гекс.	1	2.67	96	84	91	89	103	~77
3	Апатит	А-1-3	Гекс.	1	0.78	94	86	81	99	~76	104
4	Апатит	А-1-3	Гекс.	1, 2	2.67	93	87	90	90	90	90
5	Апатит	А-006	Гекс.	1	2.67	97	83	93	87	~94	~86
6	Нефелин	Не-3	Гекс.	1, 2	2.67	90	90	-	-	85	95
7	Нефелин	Не-005	Гекс.	1	0.78	89	91	99	81	100	~80
8	Нефелин	Не-005	Гекс.	1	2.67	89	91	-	-	93	87
9	Нефелин	Не-008	Гекс.	1	0.78	90	90	86	94	90	90
10	Нефелин	Не-008	Гекс.	1, 2	1.26	103	~77	95	85	89	91
11	Турмалин	Р-011	Триг.	1, 2	2.67	86	94	-	-	98	82

В нефелинах на частоте  $f_0 = 0.78$  МГц зафиксирован линейный тип ЛААП (обр. Не-005, Не-008), а на частоте  $f_0 = 1.26$  МГц – плоскостной (обр. Не-008). Причем плоскость проходит через 1 и 3 грани.

В акустополяриграммах образца турмалина (Р-011), рис.7.3d, 7.4с, отмечается одновременное проявление двух эффектов – линейной акустической анизотропии поглощения и деполяризации сдвиговых волн (ДСВ). Эффект ЛААП регистрируется, в основном, на первой и третьей гранях. На частоте  $f_0 = 1.26$  МГц образец проявляет линейный (L2) тип проявления ЛААП, табл.7.4. На частоте  $f_0 = 2.67$  МГц проявляется комбинация линейного и плоскостного типов, где вытянутые элементы среды ориентированы по направлению грани 2, а плоскость проходит через грани 1 и 2. Эффект ДСВ очень сильно проявлен на второй грани. Это означает, что в плоскостях, параллельных грани 2 наблюдается веерное расположение структурных элементов среды этого образца турмалина (см. п.3.1, 3.2).

Следует заметить, что и в оптике турмалин отличается сильным проявлением эффекта плеохроизма. Элементы симметрии в образце

турмалина выделяются только на гранях 1 и 3. Их взаимные углы находятся в пределах  $82-98^{\circ}$ , табл.7.3.

Табл. 7.4.

Показатели линейной акустической анизотропии поглощения в образцах некоторых породообразующих минералов средних сингоний

№ №	Наименование минерала	Номер образца	Сингония	Номер опыта	Частота, МГц	$D_1$	$D_2$	$D_3$	Примечания
1	Апатит	A-1	Гекс.	1, 2	1.26	0.045	0.01	0.08	L2
2	Апатит	A-1-3	Гекс.	1	0.78	0.020	0.029	0.10	
3	Апатит	A-1-3	Гекс.	1, 2	2.67	0.032	0.09	0.033	L1
4	Апатит	A-006	Гекс.	1	2.67	0.04	0.14	0.10	
5	Нефелин	He-3	Гекс.	1	2.67	0.021	0.00	0.00	
6	Нефелин	He-005	Гекс.	1	0.78	0.038	0.25	0.32	L1
7	Нефелин	He-005	Гекс.	1	2.67	0.048	0.00	0.022	
8	Нефелин	He-008	Гекс.	1	0.78	0.10	0.072	0.14	L2
9	Нефелин	He-008	Гекс.	1, 2	1.26	0.072	0.18	0.62	P1-3
10	Кварц	Qu-11	Триг.	3, 4	0.6	0.00	0.14	0.06	
11	Кварц	Qu-11	Триг.	1, 2	1.2	0.00	0.04	0.36	
12	Турмалин	P-011	Триг.	1, 2	1.26	0.23	0.06	0.59	L2
13	Турмалин	P-011	Триг.	1, 2	2.67	0.52	0.14	0.54	L2, P1-2
Примечание: L – линейный, P – плоскостной типы проявления ЛААП; 1, 2, 3 – направления 1-1', 2-2', 3-3', вдоль которых проявляется эффект, см. рис.5.1									

Наиболее тщательно была выполнена акустополарископия образца синтетического кварца (обр. Qu-11). Причем, акустополарископия и определения положения элементов упругой симметрии по отношению к кристаллографической оси [0001] образца проведены 4 раза. Образец кварца, подготовленный для измерений, имел форму куба с ребром 4 см. Он вырезан так, что его кристаллографическая ось [0001] перпендикулярна грани 1 и соответственно параллельна направлению 1-1' с точностью  $\pm 1^{\circ}$  (рис.7.5а).

Акустополариграммы четырех последовательных определений, полученные в трех взаимноперпендикулярных направлениях куба 1-1', 2-2', 3-3', приведены на рис.7.6. Акустополариграммы (рис.7.6а, 7.6б, табл.7.5., номера измерений 1, 2) получены с использованием регистрирующего прибора УД-2-12, усилитель которого имеет резонансную частоту  $f_0 = 1.2$  МГц и с использованием прибора ДУК-66 ПМ, при частоте  $f_0 = 0.6$  МГц (рис.7.6с, 7.6д, табл.7.5. – номера измерений 3, 4).

В направлении 1-1' при параллельных векторах поляризации (положение ВП) получены трехлепестковые акустополариграммы. Максимальная амплитуда в каждом из лепестков зарегистрирована в

направлениях, совпадающих с положением плоскостей упругой симметрии, проходящих через ось  $[0001]$ . При скрещенных векторах поляризации (положение ВС) зафиксированы диаграммы, имеющие шесть лепестков.

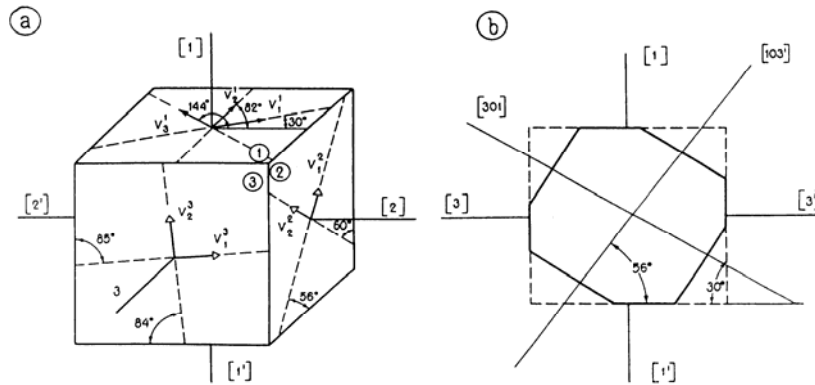


Рис.7.5. Ориентировка элементов упругой симметрии в образце синтетического кварца по данным акустополярископии (а); схема образования дополнительных граней по нормали к направлениям 301 и 103 (б).

Результаты измерений угловых положений минимумов ВС относительно ориентировки граней образца приведены в табл.7.5. В направлении 2-2' акустополяриграммы ВП представляют собой четырехлепестковую фигуру, характерную для сред с двумя пересекающимися элементами симметрии. О том же свидетельствуют диаграммы ВС.

Положения минимумов диаграмм ВС показывают, что между положением кристаллографической оси (направление 1-1') и элементами упругой симметрии имеется определенный угол (табл.7.5). Акустополяриграмма ВП, полученная в направлении 3-3', указывает на довольно сложный характер распространения поляризованных сдвиговых колебаний в упругоанизотропной среде образца. Однако по минимумам диаграммы ВС можно выделить пространственную

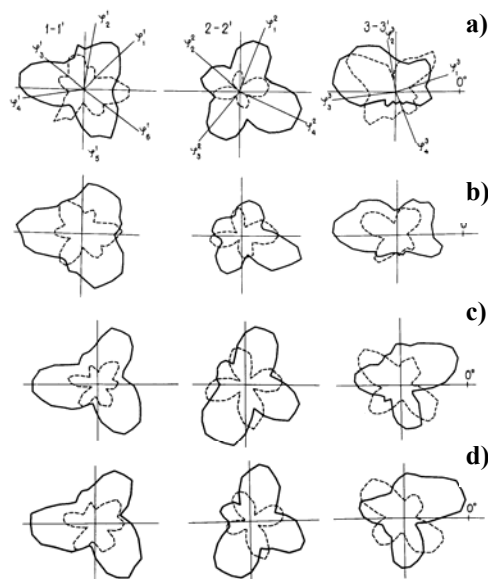


Рис.7.6. Акустополяриграммы кубического образца синтетического кварца, полученные при частотах  $f_0 = 1.2$  МГц (а, б) и  $f_0 = 0.6$  МГц (с, д).



направленность двух элементов упругой симметрии, положение которых близко к направлению кристаллографической оси (направление 1-1') и перпендикулярную к ней (табл.7.5).

Данные табл.7.5 также показывают, что положения отдельных элементов симметрии различаются от измерения к измерению, с учетом последовательных снятия и нового закрепления образца на столики акустополярископа, на  $2^0$  и более градусов. Причем, регистрация прибором с иной резонансной частотой усилителя влияет на очертания акустополяриграмм ВП и ВС. Однако, положения минимумов ВС относительно направлений 1-1', 2-2', 3-3', в целом, остаются стабильными. Если судить по средним из серии измерений  $\varphi_1^1 - \varphi_6^1$  по акустополяриграммам, одна из плоскостей упругой симметрии кварца по направлению 1-1' находится под углом  $\varphi_1^1 = 30^0$ , вторая -  $\varphi_3^1 = 144^0$ , третья -  $\varphi_5^1 = 266^0$  к направлению 2-2'. Их взаимные углы составляют  $\theta_1 = \varphi_3^1 - \varphi_1^1 = 144^0$ ;  $\theta_2 = \varphi_5^1 - \varphi_3^1 = 122^0$ ;  $\theta_3 = \varphi_1^1 - \varphi_5^1 = 124^0$ .

По грани 2 средний угол наклона одного из элементов симметрии составляет  $\varphi_{1-3}^2 = 56^0$  и  $\varphi_{2-4}^2 = 150^0$  к направлению 3-3'. Соответственно, расхождение с направленностью кристаллографической оси [0001] этих элементов составляет  $\psi_{1-3}^2 = 34^0$  и  $\psi_{2-4}^2 = 60^0$ . Измерениями по грани 3 получено, что углы  $\varphi_{1-3}^3 = 5^0$  и  $\varphi_{2-4}^3 = 96^0$ . Расхождение с направленностью оси [0001] составляет, соответственно,  $\psi_{1-3}^3 = 85^0$  и  $\psi_{2-4}^3 = 6^0$ . На рис.7.5а элементы упругой симметрии вынесены на грани образца. Рисунок иллюстрирует пространственное расхождение между ориентацией оси [0001] и элементами упругой симметрии.

На следующем этапе нами измерены фазовые скорости распространения продольных  $V_p$  и сдвиговых  $V_s$  колебаний вдоль направлений 1-1', 2-2', 3-3' по схеме, приведенной на рис.7.5а. Для этой цели, перпендикулярно направлениям [301] и [103'] были образованы дополнительные, параллельные друг другу грани так, как это показано на рис.7.5b. Результаты измерений  $V_p$ ,  $V_s$  приведены в табл.7.5. Используя эти данные, в плоскости грани 2 построены индикатриссы величин скорости продольных  $V_p$  и сдвиговых  $V_{so}$ ,  $V_{s\perp}$  колебаний (рис. 7.7), при векторе поляризации, соответственно находящемся параллельно плоскости 2 и перпендикулярно ей.

Согласно данным табл.7.5 и рис.7.5b, направление [301], в котором измерена величина  $V_{pmax} = 7.07$  км/с лежит под углом  $60^0$  к оси [0001]. Известно, что модуль (константа) упругости (Безухов, 1968)

$$C_\varphi = \rho f(V_{p\varphi}^2), \quad (7.1)$$

где  $\rho$  – плотность,  $V_{p\varphi}^2$  - фазовая скорость.

Табл.7.5

Результаты определения положения элементов симметрии  
в образце синтетического кварца

Но- мер изм.	Грань 1						Грань 2				Грань 3				
	Угол	$\varphi_1^1$	$\varphi_2^1$	$\varphi_3^1$	$\varphi_4^1$	$\varphi_5^1$	$\varphi_6^1$	$\varphi_1^2$	$\varphi_2^2$	$\varphi_3^2$	$\varphi_4^2$	$\varphi_1^3$	$\varphi_2^3$	$\varphi_3^3$	$\varphi_4^3$
1	39	79	149	209	269	319	54	144	244	324	3	103	183	283	
2	43	83	153	203	273	323	58	148	238	318	5	105	195	265	
3	17	87	137	207	262	327	50	150	230	330	5	90	190	275	
4	21	81	136	201	261	331	60	160	235	330	7	87	177	263	
Сре- днее	30	82	144	205	266	325	56	150	237	326	5	96	186	271	
$K_{вр},$ %	7.1	1.6	4.7	2.0	3.2	2.9	2.5	4.0	3.2	3.2	1.0	5.0	4.4	5.2	
$V_s,$	4.33	4.30	4.33	4.31	4.33	4.30	4.89	3.26	4.81	3.25	3.64	4.00	3.64	4.09	
$V_p: V_{11}=6.32, V_{301}=7.07, V_{22}=5.77, V_{103}=6.26, V_{33}=5.78$ км/с; $V_s: V_{12}=4.32, V_{13}=4.30, V_{21}=4.33, V_{23}=3.64, V_{31}=4.00, V_{32}=3.64$ км/с.															

Таким образом, модуль (константа) продольной упругости в направлении [301] принимает наибольшее значение. Направление [301] не совпадает с направленностью кристаллографической оси [0001]. Это является причиной углового расхождения между направленностью палеостресса и осью [0001] в зернах кварца метаморфизованной породы (Кожевников, 1982; Горбачевич, Басалаев, 1993).

Отметим, что направление 3-3', в котором наблюдается минимальная величина  $V_{pmin}=5.78$  км/с, не является перпендикулярным направлению [301]. Максимальная величина  $V_{s\perp}=4.89$  км/с лежит в направлении [103], а минимальная  $V_{s\perp}=3.26$  км/с – в направлении [301]. Контраст величин  $V_{so}$  по различающимся направлениям не настолько велик и находится в пределах от  $V_{so}=V_{21}=4.33$  км/с (направление 1-1'), до  $V_{so}=V_{103}=3.23$  км/с.

Полученная индикатрисса, рис.7.7, в целом, подобна сечениям плоскостью  $yz$  поверхности фазовых скоростей продольных волн (табл.7.5). Подобные данные были ранее опубликованы О.И.Силаевой, И.С.Делицыным (Силаева, Делицын, 1970), а также Г.Фарнеллом (Farnell, 1961).

Таким образом, акустополарископия образца синтетического кварца в направлении тройной кристаллографической оси фиксирует проекции трех плоскостей симметрии (диаграмма ВС), повернутых друг относительно друга на угол  $60^0$ . Положение этих плоскостей можно определить, как следует из рис.7.2а, со сравнительно большой точностью.

В направлении 2-2' акустополяриграммы ВП представляют собой четырехлепестковую фигуру, характерную для сред с двумя пересекающимися элементами симметрии. О том же свидетельствуют диаграммы ВС. Положения минимумов диаграмм ВС показывают, что между положением кристаллографической оси (направление 1-1') и элементами упругой симметрии имеется определенный угол, примерно равный  $60^\circ$ . Акустополяриграмма ВП, полученная в направлении 3-3', показывает на довольно сложное взаимодействие поляризованных сдвиговых колебаний с элементами упругой симметрии образца кварца. Однако по минимумам диаграммы ВС можно выделить пространственную направленность двух элементов упругой симметрии, положение которых близко к направлению кристаллографической оси (направление 1-1') и перпендикулярно к ней.

Данные, приведенные на рис. 7.6 и в табл.7.5 показывают, что метод акустополярископии позволяет определять пространственную направленность элементов упругой симметрии минерала без измерения величин скорости распространения продольных и поперечных колебаний. Полученные нами значения скорости  $V_{ij}$ , в целом, соответствуют пересчитанным из справочных данных (Беликов, Александров, Рыжова, 1970, Александров, Продайвода, 2000). Однако величины констант упругости кварца, приводимые в справочниках, измерены вдоль кристаллографических осей и не отражают наибольших и наименьших значений упругости этого минерала. Образец кварца, рис.7.5, проявляет, судя по величинам  $D$ , сравнительно малую степень ЛААП. Причем, степень проявления этого эффекта зависит от частоты зондирующих колебаний. Как было показано выше, показатель  $D$  нефелина также зависит от частоты.

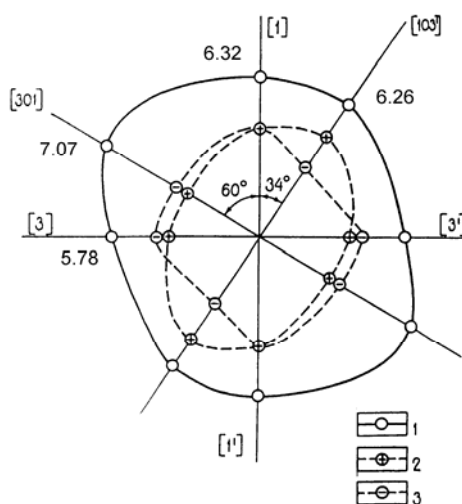


Рис.7.7. Индикатрисса величин скорости распространения упругих волн в плоскости 2-2' в образце кварца. 1 –  $V_p$ , 2 –  $V_{s\perp}$  с вектором поляризации по нормали к плоскости 2-2', 3 –  $V_{so}$  с вектором поляризации в плоскости 2-2'.

## 7.2. Минералы низших сингоний

Категория низших сингоний включает среды орторомбической, моноклинной и триклинной систем симметрии. На рисунке 7.8 приведены акустополяриграммы арагонита (ромб.), ставролита (ромб.), диопсида (мон.) и амфибола (мон.). Кристалл арагонита, подготовленный для испытаний (обр.Х2-7,  $f_0 = 0.78$  МГц) отличается волосовидное строение и совершенная спайность. Акустополяриграммы указывают на, как правило, наличие ЛААП и неоднородное строение имевшихся в нашем распоряжении образцов, рис.7.8. В образце Х2-7 значительное проявление эффекта ЛААП, регистрируется на гранях 2 и 3. Обратные акустополяриграммы этого образца, рис.7.9, позволяют сравнительно точно определить взаимное положение элементов симметрии на гранях 2 и 3. Взаимные углы между этими элементами, по данным ряда определений, лежат в диапазоне  $82-98^\circ$ , табл.7.6. В отличие от обр.Х2-7, степень проявления ЛААП в обр.Х2-11 существенно ниже, табл.7.7. Данные таблицы свидетельствуют, что образцы арагонита проявляют как линейный, так и плоскостной типы ЛААП.

Образец ставролита (обр. St-1-1), акустополяриграмма которого получена на частоте  $f_0 = 1.26$  МГц, рис.7.8b, имеет сравнительно однородное строение. Направленность элементов симметрии четко прослеживается на всех трех его обратных акустополяриграммах, рис.7.9b. Взаимные углы между элементами на грани 1 составляют  $85^\circ$  и  $95^\circ$ , на других гранях они практически не отличаются от прямого угла, табл.7.6.

Образец St-1-1 проявляет сравнительно малую степень ЛААП, причем плоскостного типа, табл.7.7. Плоскость, вдоль которой наблюдается наименьшее поглощение, проходит через направления 2 и 3. Как известно, ставролит отличается практически полное

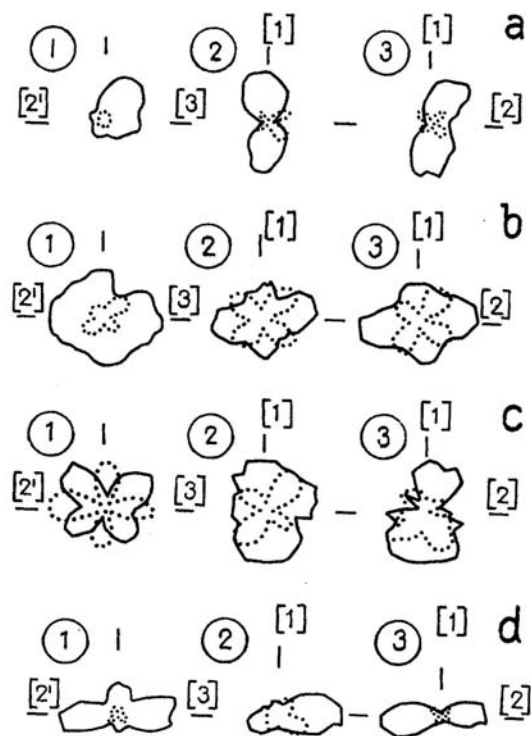


Рис.7.8. Акустополяриграммы образцов минералов: арагонита (а), ставролита (b), диопсида (с) и амфибола (d).

отсутствие спайности (Трегер, 1968). Этим и объясняется малая степень проявления в нем ЛААП.

Акустополярископия кристалла диопсида (обр. D-009  $f_0 = 2.67$  МГц) показывает существенно более сложный тип упругой анизотропии, рис. 7.8. Если два первых направления (по нормали к граням 1 и 2) указывают на наличие двух, находящихся практически под прямым углом, элементов симметрии, то на третьей грани диаграмма ВС обнаруживает три проекции таких элементов, взаимные углы между которыми составляют  $83^\circ$ ,  $56^\circ$  и  $41^\circ$ , табл. 7.6. Причем, направленность элементов симметрии на третьей грани определены на частоте  $f_0 = 2.67$  МГц. На частоте  $f_0 = 1.26$  МГц этого сделать не удалось. В известной степени, минерал диопсид сходен с кварцем. Но его акустополаризационные диаграммы показывают определенное отличие от акустополаризационных диаграмм кварца, рис. 7.6. Взаимные углы между элементами симметрии на первой грани могут не отличаться от прямого, табл. 7.6, но на второй грани их величины составляют  $64-80^\circ - 100-116^\circ$ .

Для минерала диопсида отмечается зависимость проявления эффекта ЛААП от частоты колебаний, табл. 7.7. На частоте  $f_0 = 1.26$  МГц показатель ЛААП, измеренный на гранях 2 и 3, более чем в 2 раза выше, чем на частоте  $f_0 = 2.67$  МГц. При повышении частоты плоскостной характер ЛААП типа P2-3 переходит в линейный L1.

Акустополаризационные диаграммы кристалла амфибола (обр. А-030) получены на частотах  $f_0 = 0.78, 1.26$  и  $2.67$  МГц, рис. 7.8, табл. 7.6, 7.7. Испытания на всех этих частотах показали очень существенное проявление эффекта ЛААП. Показатель  $D$  на частотах  $f_0 = 1.26, 2.67$  МГц, по крайней мере, на одной из граней достигает  $0.8-0.9$ . Как правило, одновременно проявляется и линейная и плоскостная формы проявления ЛААП. Таким

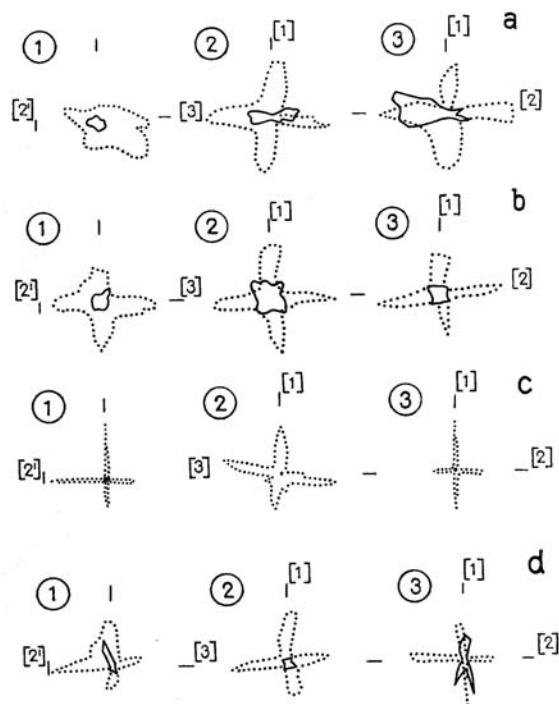


Рис. 7.9. Примеры обратных акустополаризационных диаграмм образцов арагонита (а), ставролита (б), нефрита (с) и микроклина (д)

образом, можно сделать вывод, что элементы цепочечной структуры минерала не изометричны в поперечном сечении.

Взаимные углы элементов симметрии в кристалле амфибола варьируют в пределах 85-95<sup>0</sup>. Какой либо зависимости этих углов от частоты зондируемых колебаний не отмечается

Табл.7.6

Взаимные углы между проекциями элементов упругой симметрии в образцах порообразующих минералов низших сингоний

№ №	Наименование минерала	Номер образца	Сингония	Номер опы-та	Частота, МГц	Грань 1		Грань 2		Грань 3	
						$\alpha_1$ , гр.	$\alpha_2$ , гр.	$\alpha_1$ , гр.	$\alpha_2$ , гр.	$\alpha_1$ , гр.	$\alpha_2$ , гр.
1	Арагонит	X2-7	Ромб.	1-3	0.78	~91	~89	92	88	83	97
2	Арагонит	X2-11	Ромб.	1,2	0.78	86	94	91	89	97	83
3	Ставролит	St-1-1	Ромб.	1	1.26	95	85	91	89	90	90
4	Амфибол	A-030	Мон.	1	0.78	-	-	96	84	93	87
5	Амфибол	A-030	Мон.	1, 2	1.26	95	85	~84	~96	~84	~96
6	Амфибол	A-030	Мон.	1-3	2.67	91	89	~96	~84	93	87
7	Диопсид	D-009	Мон.	1	1.26	96	84	116	~64	-	-
8	Диопсид	D-009	Мон.	1, 2	2.67	90	90	100	80	83, 56, 41	-
9	Нефрит	Ne-3	Мон.	1	1.26	99	81	83	97	-	-
10	Нефрит	Nefr-033	Мон.	1	0.78	93	87	95	85	92	88
11	Нефрит	Nefr-033	Мон.	1	2.67	91	89	101	79	91	89
12	Ортоклаз	O-015b	Мон.	1	0.78	78	102	86	94	-	-
13	Ортоклаз	O-015b	Мон.	1-3	2.67	90	90	91	89	89	91
14	Ортоклаз	O-019b	Мон.	1	0.78	90	90	95	85	101	79
15	Ортоклаз	O-019b	Мон.	1, 2	1.26	79	101	-	-	89	91
16	Сподумен	SP-1-1	Мон.	1	1.26	90	90	91	89	-	-
17	Микро-клин	XIX-1-b	Три-кл.	1-3	0.78	-	-	91	89	86	94
18	Микро-клин	M-1	Три-кл.	1	0.78	87	93	87	93	86	94
19	Микро-клин	M-1	Три-кл.	1	1.26	-	-	86	94	97	83
20	Микро-клин	M-1	Три-кл.	1	2.67	92	88	-	-	95	85
21	Микро-клин	M-2	Три-кл.	1	0.78	97	83	88	92	86	94
22	Микро-клин	M-2	Три-кл.	1	1.26	~83	~97	~84	~96	97	83
23	Микро-клин	M-2	Три-кл.	1, 2	2.67	89	91	90	90	87	93

Образец нефрита Nefr-033, подготовленный к измерениям, отличала сравнительно высокая однородность и отсутствие посторонних включений. Соответственно, очертания акустополяриграмм этого образца, рис.7.10, довольно близки к теоретически предсказанным, см. п.1.4. Исключительную однородность обр. Nefr-033 подтверждают очертания его обратных акустополяриграмм, рис.7.9с. Взаимные углы элементов симметрии на грани 2 существенно отличаются от прямого и составляют  $79-101^{\circ}$ , табл.7.6. Данный образец нефрита отличает малая степень эффекта ЛААП, табл.7.7, с сочетанием линейного и плоскостного типов его проявления ( $f_0 = 0.78$  МГц). Для образца Ne-3 сохраняются примерно такие же характеристики, что и для Nefr-033.

Акустополаризационные определения ортоклаза выполнены на двух образцах. Причем, на некоторых частотах они были повторены 2 и 3 раза, табл.7.6 и 7.7. Взаимные углы между элементами симметрии в образце O-15b на частоте  $f_0 = 2.67$  МГц на всех трех гранях не отличаются практически от прямого. Однако на частоте  $f_0 = 0.78$  МГц на грани 1 в том же образце зафиксированы углы  $78-102^{\circ}$ . В образце O-19b такие же углы зарегистрированы на грани 1 ( $f_0 = 1.26$  МГц) и на грани 3 ( $f_0 = 0.78$  МГц).

Также как и для амфибола, для ортоклаза свойственно проявление эффекта ЛААП высокой степени, в особенности на частотах  $f_0 = 1.26, 2.67$  МГц, табл.7.7. Причем, сравнительно одинаковая степень проявления этого эффекта регистрируется как на образце O-015b, так и на образце O-019b.

Как правило, на этих образцах наблюдается комбинация плоскостного и линейного типов ЛААП. На образце O-019b с повышением частоты отмечается переход направлений, в которых регистрируется линейный или плоскостной тип ЛААП. Например, при частоте  $f_0 = 0.78$  МГц выявляются линейные структуры минерала, которые ориентированы в сторону нормали к первой грани, табл.7.7. При частоте  $f_0 = 1.26$  МГц линейные структуры минерала, ориентированные к первой грани сохраняют свое влияние, но при этом проявляется плоскость, проходящая через направления 1-3. На частоте  $f_0 = 2.67$  МГц проявляются линейные структуры в направлении 2 и плоскость, проходящая через направления 2-3.

По-видимому, на увеличение частоты колебаний откликаются структурные элементы минерала и отдельности, обусловленные спайностью. Например, при приближении частоты, длина волны ( $\lambda/4$ ) которой будет соизмерима со структурным элементом или отдельностью, поглощение колебаний будет максимальным. Подобное явление наблюдал Т.М.Проктор на искусственных средах (Proctor, 1971).

Образцы микроклина XIX-1-b, M-1 и M-2 были изготовлены таким образом, чтобы кристаллографическая ось [001] совпадала с направлением 1-1' нормали к грани куба, а ось [010] - с направлением 2-2'. Полученные при скрещенных векторах поляризации акустополяриграммы

показывают, что направленность проекций элементов упругой симметрии практически перпендикулярна граням образцов, (рис.7.10с, 7.9d; табл.7.6). Проекции элементов упругой симметрии наблюдаются во всех трех взаимно перпендикулярных направлениях.

Табл.7.7

Показатели линейной акустической анизотропии поглощения в образцах некоторых породообразующих минералов низшей категории сингоний

№ №	Наименование минерала	Номер образца	Сингония	Номер опыта	Частота, МГц	$D_1$	$D_2$	$D_3$	Примечания
1	Арагонит	X2-7	Ромб.	1, 2	0.78	0.22	0.72	0.66	L1, P1-3
2	Арагонит	X2-11	Ромб.	1, 2	0.78	0.10	0.14	0.16	L3, P2-3
3	Ставролит	St-1-1	Ромб.	1	1.26	0.022	0.13	0.18	P2-3
4	Амфибол	A-030	Мон.	1	0.78	0.55	0.14	0.29	L1, P1-2
5	Амфибол	A-030	Мон.	1, 2	1.26	0.34	0.64	0.89	L1, P1-3
6	Амфибол	A-030	Мон.	1-3	2.67	0.43	0.57	0.88	L2, P2-3
7	Диопсид	D-009	Мон.	1, 2	1.26	0.013	0.56	0.66	P2-3
8	Диопсид	D-009	Мон.	1, 2	2.67	0.012	0.20	0.18	L1
9	Нефрит	Ne-3	Мон.	1	1.26	0.062	0.034	0.17	
10	Нефрит	Nefr-033	Мон.	1	0.78	0.21	0.12	0.22	L1, P1-3
11	Нефрит	Nefr-033	Мон.	1, 2	2.67	0.013	0.083	0.05	
12	Ортоклаз	O-015b	Мон.	1	0.78	0.44	0.24	0.14	L2, P1-3
13	Ортоклаз	O-015b	Мон.	1, 2	2.67	0.64	0.67	0.45	L3, P1-3
14	Ортоклаз	O-019b	Мон.	1	0.78	0.054	0.22	0.29	L1
15	Ортоклаз	O-019b	Мон.	1, 2	1.26	0.33	0.41	0.50	L1, P1-3,
16	Ортоклаз	O-019b	Мон.	1-3	2.67	0.53	0.61	0.74	L2, P2-3
17	Сподумен	SP-1-1	Мон.	1	1.26	0.25	0.11	0.024	P1-3
18	Микроклин	XIX-1-b	Трикл.	1	0.78	0.84	0.87	0.64	P2-3, L3
19	Микроклин	M-1	Трикл.	1	0.78	0.27	0.26	0.24	P2-3, L2
20	Микроклин	M-1	Трикл.	1	1.26	0.33	0.065	0.72	L2
21	Микроклин	M-1	Трикл.	1	2.67	0.42	0.022	0.40	P1-2
22	Микроклин	M-2	Трикл.	1	0.78	0.045	0.49	0.47	P2-3
23	Микроклин	M-2	Трикл.	1	1.26	0.78	0.11	0.87	L2
24	Микроклин	M-2	Трикл.	1	2.67	0.67	0.022	0.44	P1-3

Примечание: L – линейный, P – плоскостной типы проявления ЛААП; 1, 2, 3 – направления 1-1', 2-2', 3-3', вдоль которых проявляется эффект, см. рис. 5.1



Это свидетельствует о том, что микроклин обладает типом упругой симметрии не выше орторомбического. Вместе с этим, отличия взаимных углов между элементами упругой симметрии от прямого не очень значительны. Обзор данных табл.7.6 позволяет заметить, что на всех частотах и образцах эти отличия не превышают  $5^{\circ}$ .

Представленные в табл.7.7 результаты определений свидетельствуют о весьма значительном диапазоне проявления эффекта ЛААП в микроклинах. Например, в образцах М-1 и М-2, рис.7.10с, 7.10d, акустополяриграммы которых получены при частоте  $f_0 = 1.26$  МГц очень ярко проявляется эффект ЛААП. Для первой, второй и третьей пары граней образца М-2 они, соответственно, равны  $D_1 = 0.78$ ,  $D_2 = 0.11$ ,  $D_3 = 0.87$ . На гранях 1 и 3 этих образцов при параллельных векторах поляризации зарегистрированы акустополяриграммы, диаметр которых вдоль направления 2 значителен, а вдоль направлений 1 и 3 - мал. Судя по направленности наибольших диаметров акустополяриграмм ВП граней 1-1' и 3-3', в образцах М-1 и М-2 зарегистрирован линейный тип проявления этого эффекта L2.

Наиболее вероятным объяснением наблюдаемого явления ЛААП, как и линейности его типа является следующее. В направлении кристаллографической оси  $[001]$  в кристаллах микроклина наблюдается совершенная спайность. Ее плоскости параллельны плоскости  $(010)$  кристалла. В направлении  $[010]$  также наблюдается совершенная спайность, но ее плоскости параллельны плоскости  $(001)$ . В направлении 2-2' плоскости этих двух систем спайности пересекаются с углом, близким к прямому. По этой причине мы наблюдаем сильное проявление эффекта ЛААП в направлении 1-1' от одной спайности, а в направлении 3-3' от другой. В направлении 2-2' сигнал ослабляется в одинаковой степени как от одной спайности, так и от другой. Поэтому степень проявления ЛААП, зарегистрированная на

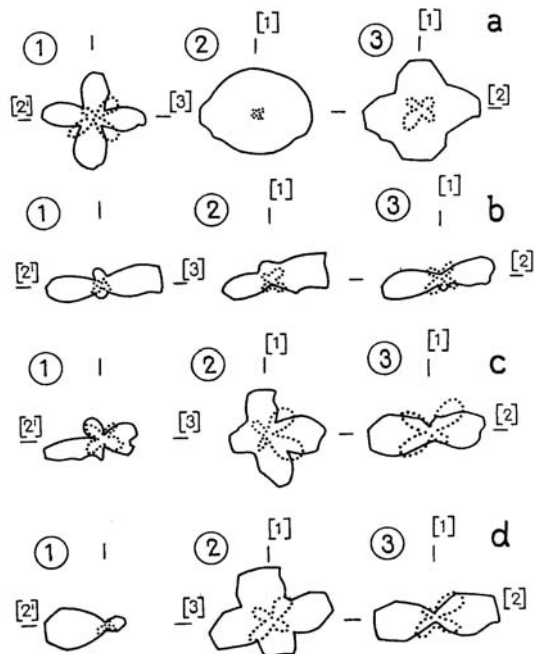


Рис.7.10. Акустополяриграммы образцов минералов: нефрита (а), ортоклаза (b), микроклина, обр.М-1 (с) и микроклина, обр. М-2 (d).

грани, 2 мала.

Однако на других частотах колебаний, также как и в образцах ортоклазов, происходит смена типа проявления ЛААП и направлений, связанных с этим эффектом, табл.7.7. Например, на частоте  $f_0 = 0.78$  МГц в образце XIX-1-b регистрируется плоскостной P2-3 и линейный L3 типы. На частоте  $f_0 = 2.67$  МГц наблюдается плоскостной (обр.М-1, - P1-2; обр.М-2, - P1-3). Таким образом, в микроклине, также как и в ортоклазе, на одной частоте наибольшее поглощение происходит на структурных элементах одной спайности, при другой – на элементах другой. Сравнительно одинаковое поглощение на обоих элементах происходит на частоте  $f_0 = 1.26$  МГц.

Впервые эффект линейной акустической анизотропии поглощения обнаружен в породах нижней части разреза Кольской сверхглубокой скважины (Горбацевич, 1982). Его наличие зарегистрировано в 90% от числа образцов пород из интервала глубин 4.5-12.06 км (Горбацевич, 1995). Высокая степень проявления ЛААП в микроклине позволяет сделать вывод, что наблюдение этого эффекта в кристаллических породах может быть обусловлено содержанием в них этого минерала, как и минералов полевошпатового ряда (олигоклаза, ортоклаза и др.).

До настоящего времени в научной литературе нам не приходилось встречать сведений о проявлении явлений ЛААП и ДСВ в минералах. По всей видимости, проявления ЛААП и плеохроизма в минералах не связаны между собой. Например, микроклин практически не проявляет плеохроизм (см. Приложение 2). Приведенные результаты демонстрируют возможности метода акустополарископии применительно к исследованию физических свойств минералов. С другой стороны эти данные свидетельствуют о том, как много еще предстоит сделать в целом, для всех минеральных видов.

Основные результаты выполненного исследования образцов минералов высшей и средней сингоний может быть сформулированы следующим образом.

1. Метод акустополарископии позволяет с высокой точностью определить положение и взаимные углы между элементами упругой симметрии минерала. Такие определения возможны и для сред кубической сингонии.
2. Как правило, взаимные углы между элементами упругой симметрии в образцах измеренных минералов близки к прямому. Исключение составляют кварц и диопсид. В одном из сечений этих минералов наблюдаются три элемента упругой симметрии, расположенные под взаимными углами, отличными от прямых.
3. Классы упругой симметрии минералов могут отличаться от классов симметрии, определяемых их оптическими свойствами. На это указывает, к примеру, определения параметров упругости образца

кварца, которые подтверждают различие в направленности элементов кристаллографической и упругой симметрий.

4. В минералах средних и низших сингоний отчетливо проявляется эффект линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП) ранее обнаруженный в горных породах. Эффект ЛААП весьма слабо проявляется в минералах высшей сингонии, и вероятнее всего, связан с дефектами кристаллической решетки. В силикатных минералах низших сингоний это явление наблюдается практически на всех образцах. Причем ЛААП может наблюдаться совместно с плеохроизмом (турмалин), а также независимо от последнего (ортоклаз, микроклин). В минералах, таких как амфибол, ортоклаз, микроклин, его проявление связано со спайностью в природных образцах.
5. На некоторых минералах наблюдается отчетливая зависимость проявления ЛААП, а также его типа от частоты зондируемых колебаний. Например, в микроклине, также как и в ортоклазе, при одной частоте наибольшее поглощение происходит на структурных элементах одной спайности, при другой – на элементах другой. Сравнительно одинаковое поглощение на обоих элементах происходит на частоте  $f_0 = 1.26$  МГц. Соответственно, при изменении частоты воздействия происходит смена типа проявления ЛААП. Например, при преобладающем поглощении от одной системы структурных элементов будет наблюдаться плоскостной тип. При взаимном и равном влиянии двух ортогональных систем спайности будет зарегистрирован линейный тип ЛААП.
6. В одном из сечений образца турмалина зарегистрирована акустополяриграмма с отчетливыми признаками проявления эффекта деполяризации сдвиговых волн (ДСВ).
- 7.

## 8. АКУСТОПОЛЯРИСКОПИЯ МОНО- И ПОЛИМИНЕРАЛЬНЫХ ПОРОД

### 8.1. Типы проявления эффекта линейной акустической анизотропии поглощения в кристаллических породах

В процессе акустополарископии моно- и полиминеральных пород (Горбачевич, 1995) получено сравнительно много акустополариграмм, форму которых нельзя объяснить исходя из учета проявления в них только упругой анизотропии, рис.1.4. Отличие некоторых акустополариграмм от теоретических могут объясняться неоднородностью породы. Характерные формы акустополариграмм наблюдаются при проявлении эффекта линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП) и эффекта деполяризации сдвиговых волн (ДСВ). Наши наблюдения подтверждают, что эффект ЛААП можно представить двумя основными моделями - плоскостной и линейной, рис.2.5. Плоскостная модель (I) проявляется в кристаллических породах, содержащих ориентированные трещины или плоскостные элементы (минералы), такие как слюда, тальк и др. Отличная от первой, линейная модель (II) проявляется в породах, содержащих линейные, вытянутые в одном направлении, изометричные в поперечном сечении зерна минералов. Как следует из схем, рис.2.5, отличие среды по модели I от модели II могут быть установлены только на основе системы пространственных измерений.

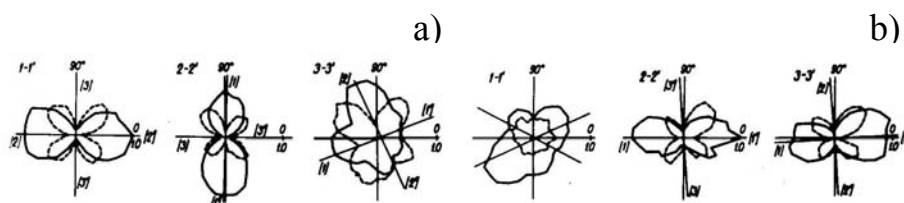


Рис.8.1. Акустополариграммы: а - тальк-флогопит-тремолитового сланца (образец 26715); б - клинопироксенового амфиболита (образец 24788). Сплошная линия - векторы параллельны, пунктир - векторы скрещены.

Проявление ЛААП по типу модели I было зарегистрировано на кубическом образце 26715 тальк-флогопит-тремолитового сланца. Четко выраженная флогопитом и тальком сланцеватость позволила точно ориентировать грани образца при его изготовлении. Акустополариграммы по трем парам граней, соответственно в направлении 1-1', 2-2', 3-3', приведены на рис.8.1.а. В направлении 1-1' ( $D = 0.83$ ) и 2-2' ( $D = 0.86$ ) среда обнаруживает высокую степень проявления эффекта линейной анизотропии поглощения. В направлении 3-3' ( $D = 0.13$ ) акустополариграмма ВП более изометрична. Направление НП на грани I ориентировано на грань 2, а на грани 2 - на грань I.

Проявление ЛААП по типу модели II наблюдалось на кубическом образце № 24788 клинопироксенового амфиболита. Текстура клинопироксенового амфиболита характеризуется хорошо видимыми сильно удлинёнными зёрнами роговой обманки. Грани образца образованы таким образом, чтобы направление 1-1' совпало с осями удлинённых зёрен. Соответственно, полученная в направлении 1-1' акустополяриграмма ВП, рис.8.1.b, показала низкую степень проявления ЛААП ( $D = 0.17$ ). В направлениях 2-2' ( $D = 0.79$ ) и 3-3' ( $D = 0.73$ ) ЛААП проявляется в значительно большей степени. Оба направления НП ориентированы на грань I. Образец № 24788 также принадлежит к сильноанизотропным средам.

В образцах №№ 26715, 24788 проявление ЛААП по типу модели I и II наблюдается наиболее четко. Однако имеются и такие среды, в которых проявление ЛААП обусловлено элементами, носящими черты как линейных так и плоскостных форм (Горбачевич, 1995).

Как следует из наблюдений, эффект линейной акустической анизотропии поглощения возникает в кристаллических породах при взаимодействиях линейно-поляризованных сдвиговых колебаний с ориентированными линейными, плоскостными и иными неоднородностями. Однако это могут быть ориентированные отверстия или трещины, как заполненные, например, жидкостью, так и не заполненные (рис.2.3). Этот эффект проявляется в минералах, горных породах, дереве, пластмассах (Gorbatsevich, 1999). По нашему мнению он может проявляться в металлах, бетонах, керамике, конструкционных, строительных и композитных материалах

## **8.2. Взаимное влияние упругой анизотропии и линейной акустической анизотропии поглощения при угловом несогласии их элементов симметрии**

В горных породах упругая анизотропия и эффект ЛААП чаще всего проявляются совместно (Горбачевич, Ильченко, 1997). По результатам наших наблюдений, пространственное положение элементов симметрии упругой анизотропии и линейной акустической анизотропии поглощения в кристаллических породах совпадает не всегда. Рассмотрим акустополяриграммы некоторых из них, рис.8.2.a-f.

Образец 30020 представляет собой биотит-плагиоклазовый гнейс. Он изготовлен из керна Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3), извлеченного с глубины 7959,1 м. По данным акустополярископии одного из его сечений, рис.8.2.a, образец 30020 является анизотропной средой с существенным проявлением эффекта ЛААП. Форму акустополяриграммы этого сечения можно соотнести с акустополяриграммой пластинки из дерева, рис.2.7, 3.

Образец 27227Ш эпидот-биотит-амфибол-плагноклазового кристаллосланца, изготовлен из керна СГ-3, отобранного с глубины  $H = 8017.0$  м. Форма акустополяриграммы ВС, полученная в одном из сечений образца, рис.8.2.b, обнаруживает признаки, свидетельствующие о наличии углового расхождения между направленностью элементов упругой симметрии и ЛААП - лепестки диаграммы ВС не равны по размеру и площади. По очертаниям диаграмм ВП и ВС можно судить, что это угловое расхождение близко полученной расчетом (рис.2.6) и на модели (рис.2.7) с углом рассогласования направлений между пластинами  $\tau = 15^\circ$ .

Образец 27026Ш куммингтонитового амфиболита также изготовлен из керна СГ-3. Акустополяриграмма, рис.8.2.c, полученная в одном из его сечений, обнаруживает сильное проявление эффекта ЛААП. Как и в предыдущем случае, лепестки диаграммы ВС неодинаковы по размеру и площади.

Форма диаграммы ВС близка диаграмме, полученной на модели с углом  $\tau$  большим  $15^\circ$ , но меньше  $30^\circ$ , рис.2.7.c. Рассогласование углов между элементами симметрии упругой анизотропии и ЛААП образца выражается в значительной асимметрии размеров лепестков акустополяриграммы ВС.

Для акустополяриграммы рис.8.2.d, сечения песчаника (обр.1753) из скважины 30p1 месторождения Яригское, Коминефть, характерна очень большая амплитуда, полученная при скрещенных векторах поляризации. Она превосходит амплитуду колебаний, зарегистрированную в положении ВП. Аналогичное соотношение получено для акустополяриграммы модели, рис.2.7.d, при  $\tau =$

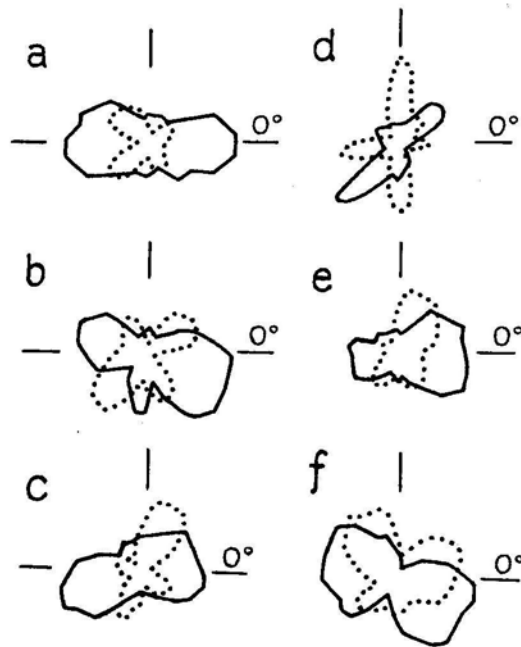


Рис.8.2. Акустополяриграммы одного из сечений образцов кристаллических пород. а – биотит-плагноклазовый гнейс (30020) б - эпидот-биотит-амфибол-плагноклазовый сланец (27227Ш), с - куммингтонитовый амфиболит (27026Ш), d – песчаник (1753), e - мелко-псефито-псаммитовый андезито-базальтовый туф (1161), f - эпидот-биотит-плагноклазовый гнейс (28184). Сплошная линия - векторы параллельны, пунктир - скрещены.

45°.

Образец 1161 изготовлен из керна Уральской сверхглубокой скважины (СГ-4). Его одна из диаграмм ВС очень вытянута, рис.8.2.e. Боковые лепестки, расположенные по нормали к наибольшему диаметру фигуры, очень малы. Формы диаграмм ВП и ВС близки формам, полученным расчетом (рис.2.6) и на модели (рис.2.7) при  $\tau = 30^0$ .

Образец 28184Ш изготовлен из керна СГ-3. Акустополяриграммы его сечения приведены на рис.8.2.f. Судя по их формам, рассогласование между элементами симметрии упругости и ЛААП в этом образце достигает  $75^0$  или  $15^0$ , см. рис.2.7.

Таким образом, акустополяриграммы, рис.8.2, указывают, что в естественных природных средах наблюдается пространственное рассогласование направлений между элементами симметрии упругой анизотропии и эффекта линейной анизотропии поглощения. Признаками такого рассогласования является наличие асимметрии в размере лепестков акустополяриграмм, полученных при скрещенных векторах поляризации. Другим признаком является увеличение амплитуды таких лепестков, в некоторых случаях до размеров, превышающих размер лепестков акустополяриграмм, полученных в положении ВП. Как показывает анализ диаграмм, рис.8.2, по очертаниям акустополяриграмм, полученных на природных средах, можно судить об углах рассогласования направленности элементов симметрии упругой анизотропии и ЛААП. Наличие такого рассогласования вплоть до углов  $\tau = 30-75^0$  позволяет считать, что физические основы упругой анизотропии и эффекта ЛААП различаются принципиально. Эффект линейной анизотропии поглощения не является только подчиненным проявлению упругой анизотропии твердых тел.

Данный вывод подтверждается также результатами, полученными на образцах СГ-3 (Горбачев и др., 1992). В процессе проведенных испытаний на каждой грани кубического образца определяли величину  $D$  и коэффициент акустического двулучепреломления  $B_S$  (6.18). Коэффициент  $B_S$  и показатель  $D$  на каждой грани, соответственно, выражают степень упругой анизотропии и линейной анизотропии поглощения среды.

На рис.8.3 представлены результаты определений показателя  $D$  и коэффициента акустического двулучепреломления на, примерно, 50 образцах, изготовленных из керна СГ-3. Форма рассеяния точек, представленных на рис.8.3 показывает, что корреляция между величинами  $B_S$  и  $D$  практически отсутствует.

Следует полагать, что взаимное влияние элементов упругой симметрии и линейной анизотропии поглощения будет наблюдаться при распространении сдвиговых волн не только в горных породах, но и в слоистых пластиках, композитах, металлических сплавах и других средах со сложной структурой.

Как сравнительно недавно выявлено (Горбацевич, 1995), упругая анизотропия и эффект линейной акустической анизотропии поглощения - совсем не редкое явление в природных средах. Так, например, в породах архейского возраста, вскрытых Кольской сверхглубокой скважиной, доля сильноанизотропных пород орторомбической симметрии, проявляющих эффект ЛААП, составляет 88% (Горбацевич и др., 1997). В разрезе Уральской сверхглубокой скважины породы орторомбической симметрии с проявлением ЛААП составляют 56%. Проявление ЛААП в массивах пород при проведении геофизических работ может приводить к существенному поглощению одной из компонент поперечных волн в волновом поле.

Признаки рас-  
согласования направ-  
лений элементов  
симметрии упругой  
анизотропии и  
эффекта линейной  
анизотропии погло-  
щения могут давать  
дополнительную ин-  
формацию о строе-  
нии, вещественном  
составе и особен-  
ностях среды. Как  
нами показано,  
такими признаками  
являются наличие  
асимметрии в разме-  
рах лепестков,  
полученных при  
акустополярископии,  
проводимой при  
скрещенных векторах

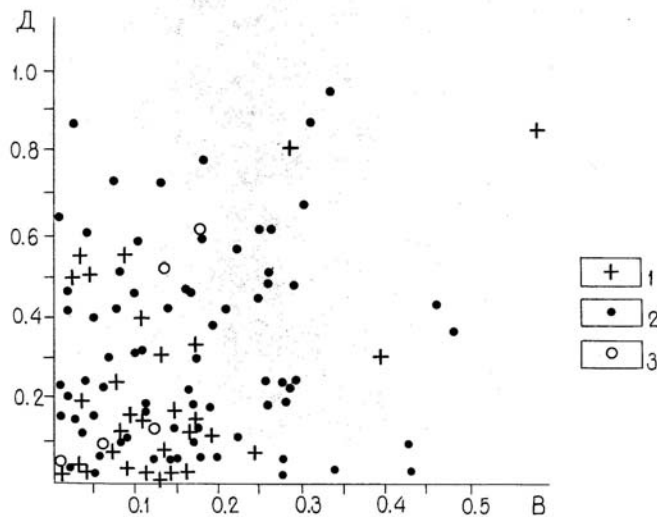


Рис. 8.3. Распределение единичных значений  $D$  - показателя ЛААП и коэффициента двулучепреломления  $V_S$  для пород Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3): 1-сланцы, 2-амфиболиты, 3-биотитовые гнейсы (граниты).

поляризации, аномальное увеличение их амплитуды. Зарегистрированные в горных породах признаки несовпадения направлений элементов симметрии упругой анизотропии и ЛААП, а также практическое отсутствие корреляционной связи между параметром анизотропии  $V_S$  и показателем  $D$ , позволяют сделать заключение, что данные эффекты могут проявляться независимо друг от друга.

Также как и оптический аналог дихроизма (Гончаренко и др., 1979; Федоров, 1965), пространственная функция линейной акустической анизотропии поглощения описывается, вероятно, тензором не ниже второго порядка. Вычисление параметров, определяющих взаимодействие двух тензоров - упругости и поглощения при



несовпадающих элементах симметрии и наличии неоднородности является сравнительно сложной задачей, которая, однако, может быть решена экспериментальным путем.

### 8.3. Экспериментальные результаты регистрации явления ДСВ в горных породах

В процессе определений методом акустополарископии упруго-анизотропных свойств образцов пород, извлеченных из Кольской (СГ-3) и Уральской (СГ-4) сверхглубоких скважин, скважин Ухтинских нефтяных месторождений и других, было отмечено довольно частое проявление эффекта деполяризации сдвиговых волн (ДСВ). На рисунке 8.4 приведены акустополариграммы 6 образцов осадочных и кристаллических пород, в которых зарегистрирован этот эффект.

Измерения выполнены на кубических образцах в трех взаимно-перпендикулярных направлениях. Соответственно, акустополариграммы 1, 2, 3 (рис.5.5) получены на первой, второй и третьей гранях одного образца. Характеристики образцов, такие как плотность, глубина отбора  $H$ , квазиматрица скорости  $V_{ij}$  (см. (5.5)), показатель эффекта линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП), приведены в табл.8.1.

Образцы осадочных пород №№ 22, 1724 (рис. 8.4а, 8.4б) отобраны из скважины месторождений "ПечорНИПИНефть". Причем в известняке (обр.22) эффект ДСВ проявился на грани 2. Если сравнивать акустополариграмму грани 2 с диаграммами рис.3.2, 3.3, можно сделать вывод, что находящиеся в плоскости грани элементы упругой симметрии минеральных зерен разориентированы друг относительно друга в пределах угла  $15^{\circ}$  или  $75^{\circ}$ . По другим граням этого образца проявление ЛААП очень значительно. В песчанике (обр.1724) эффект ДСВ проявился на грани 3, причем разориентация элементов симметрии зерен здесь составляет около  $30-40^{\circ}$ . Образцы №№ 182, 1191, отобранные из керна Уральской сверхглубокой скважины (рис. 8.4с, 8.4д), представляют кристаллический диорит (обр.182) и туф (обр.1191) вулканического происхождения. Эффект ДСВ проявляется на акустополариграммах граней 1 и 2 обр.182. Угол разориентации элементов упругой симметрии зерен можно оценить близким к  $80^{\circ}$ . На гранях 3, 4 обр.1191 наблюдается совместное проявление эффектов ДСВ и ЛААП. Углы разориентации элементов упругой симметрии в минеральных зернах могут быть в пределах  $30-50^{\circ}$ .

Сравнительно часто проявление ДСВ наблюдается в метаморфизованных архейских породах по разрезу Кольской сверхглубокой скважины. На рис. 8.4е, 8.4ф в качестве примера приведены акустополариграммы биотит-плагиоклазового гнейса (обр.30020) и гранат-клинопироксен-рогово-обманкового амфиболита (обр.31587). Судя по акустополариграммам, для обоих образцов характерно

сланцеватое строение. Однако, в плоскости грани 1 (обр.30020) и грани 3 (обр.31587) наблюдается веерное расположение элементов упругой симметрии в зернах, до взаимных углов  $50-70^{\circ}$ . На гранях 1 и 2 образца 31587 зарегистрировано очень сильное проявление эффекта ЛААП.

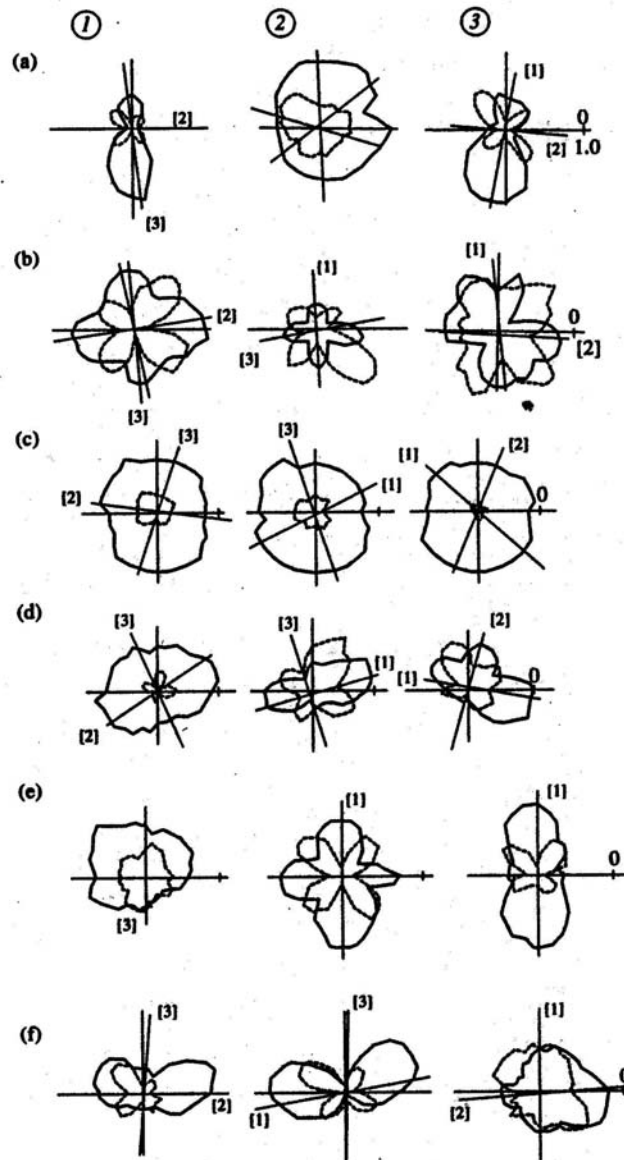


Рис.8.4. Акустополярнограммы обр.22 известняка коричневого (а), месторождение Уса, г. Ухта; обр.1724 песчаника (б), месторождение Яригское, г. Ухта; обр.182 субщелочного кварцевого диорита (с), обр.1191 туфа андезито-базальта (д) Уральской сверхглубокой скважины; обр.30020 биотит-плаггиоклазового гнейса (е), обр.31587 гранат-клинопироксен-роговообман-кового амфиболита (ф) Кольской сверхглубокой скважины. 1, 2, 3 - грани образца. Сплошная линия - векторы параллельны, пунктир - векторы скрещены

Табл. 8.1

## Упруго-анизотропные свойства образцов пород, проявляющих ЭДСВ

NN пп	Место отбора	Наименование породы	Номер образца	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Глубина отбора $H$ , м	Матрица скорости $V_{ij}$ , км/сек	Показатель ЛААП, $D$
1	Месторождение Уса, г. Ухта	Известняк коричневый	22	2.57	1234	3.32 2.18 2.20 2.22 3.64 2.26 2.15 2.09 3.52	0.82 0.03 0.61
2	Месторождение Яригское, г. Ухта	Песчаник	1724	2.68	35.1	1.89 1.39 1.38 1.36 2.14 1.42 1.41 1.39 2.03	0.07 0.09 -
3	Уральская сверх- глубокая скв. СГ-4	Субщелочной Кварцевый диорит	182	2.79	806.6	6.01 3.46 3.47 3.50 6.11 3.48 3.48 3.52 6.10	0.07 0.06 0.03
4	- " -	Туф андезито базальта	1191	2.90	2963.6	5.40 3.42 2.94 3.31 5.20 2.92 3.05 2.60 4.22	0.20 0.40 0.28
5	Кольская сверх- глубокая скв. СГ-3	Биотит- плагио- клазовый гнейс	30020	2.59	8566.4	3.12 1.75 1.75 1.66 3.93 2.05 1.70 1.90 3.71	0.00 0.05 0.59
6	- " -	Гранат- клинопироксен- рогово- обманковый амфиболит	31587	3.03	8867	4.82 2.77 2.35 2.81 4.08 2.18 - 2.00 2.69	0.47 0.45 0.09

Естественно, что проведенная выше оценка углов разориентировки элементов упругой симметрии зерен минералов в горных породах является сугубо приближительной, так как эта оценка не включает учет размера зерен, соотношений длины волны и частоты колебаний, других факторов. Определение углов  $\alpha$ , например, по оптическим индикатриссам, очень сложно из-за трудноучитываемых различий во взаимной направленности оптических и упругих элементов симметрии кристаллов (Казаков, 1985). Заметим также, что зарегистрированный

нами эффект деполяризации возникает именно из-за разориентации элементов упругой симметрии в плоскости, перпендикулярной направлению распространения колебаний. Например, на рис.8.4а-8.4f этот эффект зарегистрирован только в одном направлении из трех образца, а на рис. 8.4с, 8.4d - в двух. Если бы проявление эффекта было бы обусловлено рассеянием сдвиговых волн на мелко- или крупномасштабных неоднородностях, эффект деполяризации был бы отмечен во всех трех направлениях. Ранее, эффект деполяризации объемных упругих волн при рассеянии в случайно-неоднородной среде был описан в работе (Александров, 1997).

Теоретический анализ, эксперименты на модели и измерения методом акустополарископии упругоанизотропных свойств некоторых образцов горных пород показали, что при распространении сдвиговых волн через анизотропные среды, состоящие из структурных единиц с разноориентированными элементами упругой симметрии, могут наблюдаться ранее неисследованные явления.

По результатам анализа распространения сдвиговых волн, например методом акустополарископии, анизотропные гетерогенные среды, состоящие из взаимноортогональных по упругим свойствам слоев (зерен), могут быть идентифицированы как изотропные.

Если элементы упругой симметрии в слоях или зернах, слагающих анизотропную среду, будут взаимно разориентированы в пределах  $10-80^{\circ}$ , то распространение линейно-поляризованных сдвиговых волн в направлениях, близких нормали к плоскости разориентации сопровождается их деполяризацией, т.е. увеличением их степени эллиптичности. Это явление, названное эффектом деполяризации сдвиговых волн (ДСВ), проявляется в наибольшей степени в том случае, когда угол разориентировки элементов упругой симметрии в зернах (слоях) близок к  $45^{\circ}$ . На акустополариграммах образцов поликомпонентных сред, явление ДСВ может быть обнаружено в случаях, когда при скрещенных векторах поляризации амплитуды  $A_{\nu c}$  в точках их минимума заметно выше регистрируемых в тех же точках на акустополарископе без образца. Явление ДСВ позволяет оценить угол разориентировки элементов упругой симметрии в зернах (слоях) моно- и полиминеральных горных пород.

Явление ДСВ, проявляющееся при распространении сдвиговых волн через анизотропные среды, состоящие из структурных единиц с разноориентированными элементами упругой симметрии, в отличие от аналогичного эффекта, возникающего в неоднородных средах, регистрируется лишь в одном или двух направлениях твердого тела.

По нашему мнению, изучаемое явление ДСВ может иметь место и при распространении сдвиговых волн через геологические среды при сейсмических зондированиях. Проявлением этого явления можно объяснить отмеченное в работах Г.И.Резяпова и других (Резяпов, 1992;

Скавинский, Юн Ен Дин, 1992) увеличение эллиптичности поперечных волн на трассах сейсмических работ в Западной Сибири. Дальнейшее изучение явлений, связанных с распространением сдвиговых колебаний в поликомпонентных анизотропных средах, позволит распространить выполненную выше оценку упругих свойств, взаимной ориентировки элементов симметрии в слоистых материалах. Она применима также при анализе поликристаллических сред, таких как металлы, керамика, пластмассы, бетон, композиционные материалы и др.

#### **8.4. Принцип соответствия для метаморфизованных пород**

Применение метода акустополярископии при исследовании упругих и неупругих характеристик минералов и горных пород существенно расширило знания об их строении и свойствах. Акустополаризационные исследования пород Воче-Ламбинского геодинамического полигона, керна, извлеченного с разных глубин сверхглубокой Кольской (СГ-3), глубоких Уральской (СГ-4), Воротиловской, Тырныаузской скважин и др. показали, что в верхней части земной коры преобладают анизотропные породы орторомбического и, в меньшей степени, поперечно-изотропного типов симметрии (Горбацевич, 1995, Горбацевич и др., 1997; Розаев, Горбацевич, 1996). По данным исследований, изложенных в работе К.С.Александрова и Г.Т.Продайводы (Александров, Продайвода, 2000), в архейских гнейсах и амфиболитах наблюдаются и более низкие формы симметрии. Одним из часто регистрируемых эффектов, отражающих структурные особенности горной породы, является эффект линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП). Этот эффект фиксируется акустополаризационным методом в слоистых и линейно текстурированных породах, а также в породообразующих минералах, проявляющих совершенную спайность (Горбацевич и др., 1999).

Результаты акустополаризационных наблюдений позволяют, в целом, заключить, что упругие свойства кристаллических пород имеют как детерминированную, так и статистическую составляющие. Соотношение их долей подлежит определению для каждой конкретной породы, отобранной в каждом конкретном месте. В большинстве, тип упругой симметрии метаморфизованных кристаллических пород, по нашему мнению, может быть не ниже орторомбического. Это соображение исходит из того, что чаще всего фактором, формирующим упругую анизотропию породы, является тензор напряжений, в особенности, если эти напряжения, назовем их палеонапряжениями, действуют в течение длительного (геологического) времени.

Согласно теории упругости, что также подтверждено наблюдениями (Кожевников, 1982; Robin, 1979), между тензором палеонапряжений и типом упругой анизотропии горной породы существует прямая связь. Например, при действии одноосного поля палеонапряжений, если  $T_1 > T_2$

$= T_3$ , то с определенностью можно сделать вывод, что в породе возникнет анизотропия поперечно-изотропного типа. При наличии, например, литостатического и горизонтального тектонического полей, при  $T_1 > T_2 > T_3$ , в породе возникнет орторомбический тип упругой симметрии. Неоднородности, наличие первичной анизотропии будут искажать вид суммарной анизотропии породы.

В процессе метаморфических преобразований при возникновении анизотропии в породе реализуется принцип минимума потенциальной энергии. В соответствии с этим принципом, в направлении наибольшей компоненты поля палеонапряжений  $T_{max}$  наблюдается наименьшая величина скорости продольных колебаний  $V_{min}$ , а в направлении наименьшей компоненты  $T_{min}$  - наибольшая величина скорости  $V_{max}$  (Беликов и др., 1970; Кожевников, 1982; Горбацевич, 1995). Для элемента горной породы, расположенного в массиве, величина  $T_{min}$ , как правило, неизвестна. Причем, вблизи земной поверхности она может быть близка к нулю. В то же время, величины скорости распространения упругих волн в образце всегда имеют отличные от нуля значения. Учитывая это, в целом, соотношения между палеонапряжениями и величинами скоростей в метаморфизованной породе могут быть представлены следующим образом:

$$T_{max} = f_1(V_{max} - V_{min}) + T_{min} , \quad (8.1)$$

$$T_{cp} = f_2(V_{cp} - V_{min}) + T_{min} . \quad (8.2)$$

Величина третьей компоненты  $T_{min}$  может быть определена соотношением

$$T_{min} = f_3(V_{min} - V_0) , \quad (8.3)$$

где  $V_0$  - величина скорости в изотропном образце, измеренная до изменений, обусловленных метаморфическим процессом.

Существует определенная проблема, как определить величину  $V_0$  в уже измененной, метаморфизованной породе. За величину  $V_0$  можно принять значение  $V_{cp}$  из выражения (6.13). Однако в целом, величины скорости распространения колебаний в метаморфизованных породах, как правило, ниже, чем, например, в вулканической. В уравнениях (8.1)-(8.3)  $f_1, f_2, f_3$  отражают некоторые функциональные зависимости величин скорости  $V_{ii}$  от компонент поля палеонапряжений. Отмеченная пропорциональность, отраженная в уравнениях (8.1)-(8.3), будет распространяться на соответствие рангов матрицы скорости и тензора поля палеонапряжений.

Поскольку поле напряжений в однородных телах описывается тензором не выше второго ранга, квазиматрица (5.5) может вполне адекватно отражать соотношение величин скорости в анизотропной метаморфизованной породе. Таким образом, можно считать, что соотношения между палеонапряжениями и величинами скоростей в метаморфизованной породе отвечают некоторому принципу соответствия. Этот принцип является следствием более общего принципа суперпозиции, сформулированного Пьером Кюри (Шаскольская, 1976): если определенные причины вызывают соответствующие следствия, то элементы симметрии причин должны проявляться в вызванных ими следствиях.

Применительно к соотношению вида поля напряжений и типа упругой симметрии пород принцип соответствия можно сформулировать в следующем виде. В поле палеонапряжений, в котором три главных компоненты не равны друг другу, кристаллическая порода обретает орторомбический тип симметрии. В поле палеонапряжений, в котором две компоненты равны, а третья отлична от них по величине, порода обретает поперечно-изотропный тип симметрии. Породы, испытавшие значительный цикл метаморфических преобразований с выдержанными направлениями компонент поля палеонапряжений, будут обладать типом симметрии не ниже орторомбического.

В соответствии с сформулированным принципом соответствия, в метаморфизованных породах наиболее часто будут представлены орторомбический и поперечно-изотропный типы упругой симметрии. Действительно, породы, вскрытые по разрезу Кольской сверхглубокой скважины, имеют орторомбический и поперечно-изотропный тип симметрии, причем орторомбический является преобладающим (Горбацевич, 1995). Преобладание орторомбического типа подтверждает тот факт, что в геологическом прошлом Печенгского массива тектонические подвижки были очень активными (Кольская сверхглубокая, 1998).

Принцип соответствия вида палеонапряжений виду матрицы упругих постоянных будет нарушаться, если возникнут иные причины, влияние которых на породу будет большим, чем палеонапряжений. Например, это может быть механизм вязкого течения. Следует полагать, что распределение компонент в поле напряжений с ростом глубины будет ближе к гидростатическому (Gorbatsevich, 1996). В неоднородной породе, испытавшей несколько циклов смены напряженного состояния, наложенных друг на друга, иные воздействия, этот принцип соответствия также будет нарушен.

## 8.5. Оценка параметров палеонапряжений в массивах метаморфизованных пород

Как было показано выше, переход горной породы в анизотропное состояние происходит под воздействием палеонапряжений и деформаций в процессе структурно-метаморфической эволюции метаморфических комплексов. Поэтому сравнительный анализ величин констант упругости  $C_{\alpha\beta}$  (6.4), коэффициентов анизотропии  $A_p$ ,  $B_S$  и других данных, позволяет получить сведения о напряженном состоянии пород, которое имело место на самом значительном этапе действия палеонапряжений.

По В.Н.Кожевникову (Кожевников, 1982) в полиминеральных горных породах под воздействием негидростатического поля палеонапряжений минералы будут приобретать новую ориентировку, отражающую эволюцию основных факторов - давления, температуры и времени их воздействия.

В один и тот же интервал времени некоторые минералы будут испытывать синтетектоническую кристаллизацию и приобретать термодинамически устойчивую ориентировку. В целом же, в анизотропных породах величины упругости  $C_{\alpha\beta}$  будут связаны с компонентами тензора напряжений (палеонапряжений)  $T_{ij}$  этапа деформаций  $\varepsilon_{ij}^n$  некоторым подобием обобщенного закона Гука:

$$T_{ij} = C_{\alpha\beta} \varepsilon_{ij}^n f(t, \Lambda) \quad (8.4)$$

В этом уравнении  $t$  и  $\Lambda$  представляют собой фактор времени и температуру, точную функциональную связь которых с параметрами  $T_{ij}$ ,  $C_{\alpha\beta}$ ,  $\varepsilon_{ij}^n$  еще

предстоит установить.

Однако известно, что синтетектоническая кристаллизация обуславливает жесткую связь между  $T_{ij}$  и  $C_{\alpha\beta}$  в амфиболитах и ряде других метаморфических пород (Казаков, 1987). Если полиминеральная

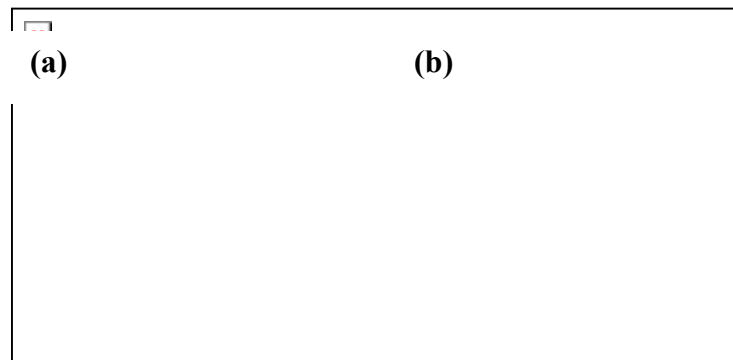


Рис.8.5. Схема ориентировки компонент  $T_1 = \sigma_1^n$ ;  $T_2 = \sigma_2^n$ ;  $T_3 = \sigma_3^n$  поля сжимающих напряжений для модели породы орторомбической (а) и псевдогексагональной (б) симметрий. Стрелкой указано направление линейности L.



порода формируется в поле напряжений сжатия, то, как было показано выше, ориентировке максимальной силы сжатия ( $T_1$ ) отвечает минимальное значение скорости распространения продольной волны ( $V_{33}$ ) или константы упругости ( $C_{33}$ ). Таким образом, максимальная сила сжатия ( $T_1$ ) будет направлена, в общем, по нормали к сланцеватости. Наименьшее палеонапряжение  $T_3$  ориентировано вдоль оси, совпадающей с линейностью и отвечающей наибольшей величине скорости распространения продольных колебаний ( $V_{11}$ ) и, соответственно, -  $C_{11}$ . Промежуточное значение  $T_2$  будет преимущественно направлено параллельно сланцева-тости, но по нормали к линейности.

Породам ром-бической симметрии будет отвечать схема, рис. 8.5а. Причем, как указано выше, в направлении 3 скорость распространения продольных колебаний минимальна. Для модели, рис. 8.5а, в направлении 1, совпадающем с линейностью, величина такой скорости максимальна, а в направлении 2 приобретает промежуточное значение. В модели сланцеватой породы псевдогексагональной симметрии можно представить ориентировку компонент палеонапряжений  $T_1, T_2 = T_3$ , как это показано на схеме, рис.8.5b.

Модели, рис.8.5, позволяют предложить коэффициенты, отражающие относительные величины компонент поля напряжений, под действием которого сформировались упругие свойства, возникли определенная ориентировка элементов симметрии и тип анизотропии. Для модели, рис. 8.5а, в соответствии с обобщенным законом Гука коэффициенты  $K_{ij}$  будут пропорциональны отношению величин констант упругости  $C_{11}, C_{22}, C_{33}$ :

$$\begin{aligned} K_{13} = T_1/T_3 = C_{11}/C_{33} = (V_{11})^2/(V_{33})^2, \quad K_{23} = T_2/T_3 = C_{11}/C_{22} = (V_{11})^2/(V_{22})^2, \\ K_{33} = T_3/T_3 = 1 \end{aligned} \quad (8.5)$$

и будут отражать отношение компонент поля напряжений для пород ромбической симметрии в направлениях 1, 2, 3. Для модели, рис. 8.5b соответственно, коэффициенты:

$$K_{12} = K_{13} = T_1/T_2 = C_{11}/C_{33} = (V_{11})^2/(V_{33})^2, \quad K_2/K_3 = 1, \quad (8.6)$$

так как здесь соотношение компонент палеонапряжений  $T_1 > T_2 = T_3$ .

Анализ величин коэффициентов  $K_{12}, K_{13}, K_{23}$ , а также пространственной ориентировки наибольших, наименьших и средних величин скорости, измеренных в образцах с сохраненной их пространственной ориентацией в массиве пород, позволит восстановить основные характеристики поля палеонапряжений.

Пример такой реконструкции, выполненной на обнажении 145 Воче-Ламбинского геодинамического полигона, приведен на рис 8.6 (Воче-Ламбинский..., 1991). Порядок измерений и определений был выбран следующим. Первоначально отобрали пробы, маркируя азимут и угол

падения их основных поверхностей. Затем, ориентируясь по слоистости (сланцеватости) и линейности, выпиливали образцы в форме куба. Затем методом акустополарископии (см. п.5.3) определили плоскости наибольшей анизотропии относительно граней образца.

Используя сетку Вульфа и данные по азимуту и углу падения граней, нами произведены расчет азимута и угла падения нормали к плоскости наибольшей анизотропии. На рисунке 8.6 на плане обнажения 145 эти направления изображены в виде стрелок. Размер стрелок пропорционален относительной величине  $K_{ij}$ . Рядом со стрелками приведены величины угла погружения направления  $T_1$ .

Обзор данных рис. 8.6 показывает, что на обнажении 145 выявляются два обособленных направления действия компоненты  $T_1$ . Измерениями на 8 образцах (серии 145-1-4, 145-1-5, 145-1-6, 145-1-8) зафиксировано одно направление с азимутом в пределах углов  $354-28^0$  и углах падения  $28-78^0$ . Азимут второго направления выдержан довольно строго и составляет  $58-67^0$  при углах падения  $30-66^0$ . Второе направление зафиксировано в образцах серии 145-1-7 и в обр. 145-1-5б/2. По приведенным выше данным можно сделать вывод, что первое и второе направления приложения  $T_1$  отражают процессы, происшедшие, соответственно, при различных этапах деформаций или циклах метаморфизма.

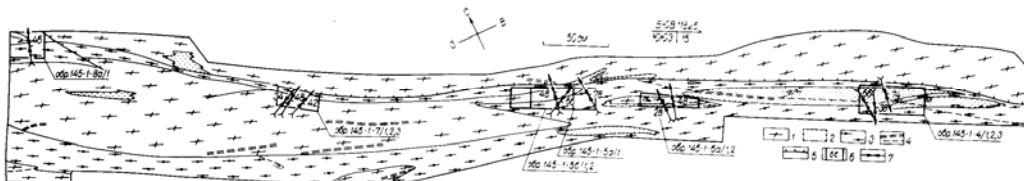


Рис.8.6. Направление и относительная величина наибольшей компоненты сжимающих палеонапряжений в плане обнажения 145 Воче-Ламбинского геодинамического полигона.

1 - плагиограниты, 2 - гранодиориты, 3 - олигоклаз-микроклиновые граниты, 4 - жильные проявления, 5 - разрывы, 6 - места отбора проб, 7 - направления действия палеонапряжений (план обнажения составлен В.В.Балаганским, Л.Н.Королевой).

Выполненная оценка направленности и относительной величины палеонапряжений, по нашему мнению, является более надежной в отношении их направленности. Относительная величина палеонапряжений, вероятно, зависит не только от факторов, отраженных в уравнении (8.4). Например, под воздействием ориентированного напряжения роговая обманка в плагиоамфиболитах способна приобретать строгую ориентировку и тем самым обеспечивать более сильную анизотропию, чем та, которая наблюдается у плагиогранитов. Дальнейшие исследования, в том числе и в области экспериментальной

минералогии для отдельных пород, позволят создать шкалы соответствия величин палеонапряжений измеренным характеристикам упругости.

Подводя итоги изложенным аспектам применения акустополарископии для исследования кристаллических пород отметим, что наиболее полные сводки результаты определений свойств образцов Кольской, Уральской сверхглубоких скважин и Воче-Ламбинского полигона уже опубликованы (Горбацевич, 1995). В этой главе основное внимание уделено экспериментальному изучению особенностей проявления новых эффектов, - линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП) и деполяризации сдвиговых волн (ДСВ). Сочетание сравнительно сильной упругой анизотропии и ЛААП встречается довольно часто, однако они могут проявляться независимо друг от друга. Зарегистрированное нами несовпадение направлений элементов симметрии упругой анизотропии и ЛААП может дать дополнительную информацию об особенностях структуры породы. Другое явление, - ДСВ позволяет оценить угол разориентировки элементов упругой симметрии в зернах (слоях) моно- и полиминеральных горных пород.

Изучение параметров палеонапряжений является не менее важным направлением. В этом направлении пока сделано относительно немного. Вместе с этим, акустополарископия позволяет определить пространственную ориентировку компонент поля палеостресса в метаморфизованной породе. Замеченные связи между величинами компонент и скорости распространения упругих колебаний позволяют судить об относительных величинах этих компонент.

По нашему мнению, очень важное значение имеет сформулированный нами принцип соответствия параметров поля палеонапряжений и типа анизотропии преобразованный этим полем метаморфизованной кристаллической породы. Согласно этому принципу: в поле палеонапряжений, в котором три главных компоненты не равны друг другу, кристаллическая порода обретает орторомбический тип симметрии. В поле палеонапряжений, в котором две компоненты равны, а третья отлична от них по величине, порода обретает поперечно-изотропный тип симметрии. Породы, испытавшие значительный цикл метаморфических преобразований с выдержанными направлениями компонент поля палеонапряжений, будут обладать типом симметрии не ниже орторомбического.

В целом, результаты акустополарископии, полученные на большом числе пород различного генезиса: осадочных, изверженных, метаморфизованных – песчаниках, доломитах, диабазах, плагиогранитах, гранодиоритах, биотитовых гнейсах, сланцах, полевошпатовых амфиболитах и др. показали, что в каждом образце, даже в слабоанизотропных образцах, можно выявить пространственную направленность элементов симметрии. Сравнительно часто, особенно в метаморфизованных породах проявляется эффект ЛААП. Определения

свойств образцов Кольской, Уральской сверхглубоких скважин, Вочеламбинского полигона и др. убедительно показали, что без первой стадии, - акустопляризационных измерений пространственного положения элементов упругой симметрии в образце, анизотропные характеристики горной породы не могут быть получены корректно. Как показала практика измерений, элементы упругой симметрии могут не совпадать элементами видимой слоистости (сланцеватости) и линейности образца. Горная порода может быть сильноанизотропной и без видимых проявлений текстуры в образце.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к параметрам упругой анизотропии природных и искусственных сред. С одной стороны это вызвано необходимостью разработки новых материалов, имеющих наибольшую упругость и прочность в желаемом направлении. С другой стороны, исследования показывают, что природные материалы, в частности, минералы и горные породы, обладают свойствами, характеризующимися различными группами симметрии, в том числе, низшими и сильной степенью анизотропии. Значительные по объемам массивы, вплоть до частей земной коры, могут быть высокоанизотропными. Эти особенности свойств масштабных геологических образований существенным образом затрудняют их изучение сейсмическими методами.

Представленный в данной работе метод акустополарископии позволяет получить все параметры, необходимые для характеристики анизотропии материала образца. Этот метод является комбинацией динамического и кинематического методов. Разработанные для реализации метода конструкции акустополарископов с поворотной платформой и с преобразователями, способными излучать и принимать чисто поперечные линейно-поляризованные колебания, обеспечивают высокоточные измерения, в том числе на образцах размером до 1 см. Последний вариант этого прибора позволяет производить измерения в автоматическом режиме с сохранением данных и их обработкой на компьютере. Компьютерная программа позволяет производить построение акустополариграмм, выделение на них проекций элементов симметрии, распечатку данных.

Согласно методике измерений, по акустополаризационным диаграммам, полученным при скрещенных векторах поляризации, определяют число, направленность и взаимное расположение элементов симметрии среды. Анализ числа и пространственных характеристик этих элементов позволяет сделать заключение о типе симметрии среды без определения величин скорости распространения продольных и поперечных колебаний в образце.

Форма акустополариграммы, полученной при параллельных векторах поляризации, позволяет определить наличие и степень проявления эффекта линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП), оценить неоднородность среды образца. Обнаружение эффекта ЛААП укажет на присутствие в исследуемом образце системы параллельно направленных неоднородностей, например, слоев вещества с разными акустическими свойствами или трещин. Увеличенные амплитуды, зафиксированные в образце при скрещенных векторах поляризации в точках, лежащих на линиях проекций элементов упругой симметрии, покажут наличие эффекта деполаризации сдвиговых волн (ДСВ) и,

соответственно, разной ориентации элементов симметрии в слоях или зернах материала. Пространственное расхождение направленности элементов упругой симметрии и элементов симметрии эффекта ЛААП имеет место в том случае, если, например, максимальная амплитуда в диаграмме, полученной при скрещенных векторах поляризации, превысит максимальную амплитуду при параллельных векторах. При таком расхождении наблюдаются также неодинаковые размеры лепестков диаграмм, полученных при скрещенных векторах поляризации.

На конечном этапе, для расчета полного набора констант упругости  $C_{\alpha\beta}$  в соответствии с выявленными элементами симметрии и в дополнительных направлениях, проводятся измерения величин скорости распространения продольных и поперечных волн. Вычисление коэффициентов анизотропии  $\epsilon_{1133}$ ,  $\epsilon_{2233}$ ,  $\gamma_{1213}$ ,  $\gamma_{1223}$ ,  $\Delta_T$  позволит разграничить изучаемую среду на слабо или сильноанизотропную, провести дополнительный анализ полученных данных. Причем, анализ соотношений величин скорости, замеренных в направлении элементов упругой симметрии, позволяет, в дополнение к определениям, выполненным по акустополяриграммам, подтвердить результаты диагностики типа симметрии.

Изложенная нами последовательность измерений и определений содержит требования, которые следует выполнить при отборе и разделке проб и подготовке образцов к проведению акустополярископии. Если отбор образцов будет выполнен с привязкой азимута и угла падения ребер и граней, нами показана возможность определения в массиве пространственного положения элементов симметрии и других параметров упругой анизотропии.

Теоретические основы метода акустополаризационных измерений разработаны только лишь для простой модели поперечно-изотропной среды. Однако предложенные нами математические выражения вполне удовлетворительно, как показала практика измерений, отражают процессы распространения поперечных колебаний в более сложных средах, вплоть до сред ромбической симметрии. Разработанная методика пригодна как для определения параметров сред с ортогональной системой взаимной ориентировки элементов симметрии, так и сред, в которых эти элементы не находятся под прямым углом друг к другу. Примеры акустополяриграмм кристаллов кварца, ортоклаза, микроклина показывают применимость получаемых экспериментальных результатов для анализа числа элементов упругой симметрии сред тригональной, моноклинной, триклинной и др. симметрий.

Наши наблюдения и существующая аналогия в области оптических явлений позволили предложить теоретические основы эффекта ЛААП и разработать две его основные модели - плоскостную и линейную. Аналогичным образом раскрыт механизм возникновения эффекта

деполяризации сдвиговых колебаний в анизотропно-неоднородных средах.

Наиболее интересные и новые результаты были получены при акустополярископии образцов порообразующих минералов. Измерения образцов минералов были выполнены на различных частотах (0.78, 1.26 и 2.67 МГц) и в некоторых случаях проводились повторно. На образцах анальцима, галита, граната, пирита нами показано, что, в отличие от оптических методов, акустополярископия позволяет определять пространственное положение элементов упругой симметрии в минералах кубической сингонии. Для всех этих образцов проявление эффекта ЛААП сравнительно малы.

Измерения на образцах минералов средних сингоний (апатита, кварца, нефелина, турмалина) показали зависимость некоторых параметров от частоты зондирующих колебаний. Упругие свойства образцов апатита, например, при частоте зондирования 2.67 МГц приобретают орторомбический тип симметрии. Образцы этого минерала не показали существенного проявления ЛААП. Нефелин практически представляет собой поперечно-изотропную среду. В образцах нефелина при низких частотах ( $f_0 = 0.78-1.26$  МГц) показатель эффекта ЛААП может достигать средних и больших величин.

Класс упругой симметрии кварца отличается от класса кристаллографической симметрии, определяемого его оптическими свойствами. На это указывает, к примеру, определения параметров упругости образца кварца, которые подтверждают различие в направленности элементов симметрии, определяемых оптическими и упругими свойствами.

В образцах турмалина отмечается одновременное проявление двух эффектов – линейной акустической анизотропии поглощения и деполяризации сдвиговых волн (ДСВ). На одних частотах проявляется линейный тип ЛААП, на других – плоскостной. Эффект ДСВ наблюдается, например, при веерном расположении структурных элементов среды. Следует заметить, что и в оптике турмалин отличается сильным проявлением эффекта плеохроизма.

Среди минералов категории низших сингоний акустополярископия была выполнена на образцах арагонита, ставролита, амфибола, диопсида, нефрита, ортоклаза, сподумена и микроклина. Взаимные углы между элементами упругой симметрии в образцах минералов, за исключением нефрита и диопсида, близки к прямому. Акустополярископия кристалла диопсида показала существенно более сложный тип упругой анизотропии. На одной из граней образца, как и в кварце, выявлено наличие трех проекции элементов симметрии.

В минералах категории низших сингоний, за исключением нефрита, отчетливо проявляется эффект ЛААП. В минералах: амфиболе микроклине, ортоклазе наблюдаются наивысшие величины показателя

ЛААП. На некоторых минералах наблюдается отчетливая зависимость проявления ЛААП, а также его типа от частоты зондируемых колебаний. Например, в микроклине, также как и в ортоклазе, при одной частоте наибольшее поглощение происходит на структурных элементах одной спайности, при другой – на элементах другой. Сравнительно одинаковое поглощение на обоих элементах происходит на частоте  $f_0 = 1.26$  МГц. Соответственно, при изменении частоты воздействия происходит смена типа проявления ЛААП. Например, при преобладающем поглощении от одной системы структурных элементов будет наблюдаться плоскостной тип. При взаимном и равном влиянии двух ортогональных систем спайности будет зарегистрирован линейный тип. Это наблюдение свидетельствует о разном шаге в системах спайности в этих силикатных минералах.

Полученные нами значения скорости  $V_{ij}$  в образцах минералов, в целом, соответствуют справочным данным. Однако величины констант упругости кварца, приводимые в справочниках, измерены вдоль кристаллографических осей и не отражают наибольших и наименьших значений упругости этого минерала.

Результаты акустополарископии, полученные на большом числе пород различного генезиса: осадочных, изверженных, метаморфизованных – песчаниках, доломитах, диабазах, плагиогранитах, гранодиоритах, биотитовых гнейсах, сланцах, полевошпатовых амфиболитах и др. показала, что в каждом образце, даже в слабоанизотропных образцах, четко выявляются пространственная направленность элементов симметрии. Сравнительно часто, особенно в метаморфизованных породах проявляется эффект ЛААП. Наиболее полная сводка результатов определений свойств образцов Кольской, Уральской сверхглубоких скважин и Воче-ламбинского полигона опубликована ранее (Горбачевич, 1995). Эти определения убедительно показали, что без первой стадии, - акустополаризационных измерений пространственного положения элементов упругой симметрии в образце, анизотропные характеристики горной породы не могут быть получены корректно. Как показала практика измерений, элементы упругой симметрии могут не совпадать элементами видимой слоистости (сланцеватости) и линейности образца. Горная порода может быть сильноанизотропной и без видимых проявлений текстуры в образце.

В данной работе основное внимание уделено экспериментальному изучению особенностей проявления новых эффектов, - ЛААП и ДСВ. Сочетание сравнительно сильной упругой анизотропии и ЛААП встречается довольно часто, однако они могут проявляться независимо друг от друга. Зарегистрированное нами несовпадение направлений элементов симметрии упругой анизотропии и ЛААП может дать дополнительную информацию об особенностях структуры породы. Другое явление, - ДСВ позволяет оценить угол разориентировки



элементов упругой симметрии в зернах (слоях) моно- и полиминеральных горных пород.

По нашему мнению, большое значение имеет сформулированный нами принцип соответствия параметров поля палеонапряжений и типа анизотропии преобразованный этим полем метаморфизованной кристаллической породы. Согласно этому принципу: в поле палеонапряжений, в котором три главных компоненты не равны друг другу, кристаллическая порода обретает орторомбический тип симметрии. В поле палеонапряжений, в котором две компоненты равны, а третья отлична от них по величине, порода обретает поперечно-изотропный тип симметрии. Породы, испытавшие значительный цикл метаморфических преобразований с выдержанными направлениями компонент поля палеонапряжений, будут обладать типом симметрии не ниже орторомбического.

Среди других аспектов применения акустополярископии для исследования кристаллических пород отметим, что изучение параметров палеонапряжений с помощью этого метода является многообещающим направлением. Заметим, что акустополярископия позволяет определить пространственную ориентировку и относительную величину компонент поля палеостресса в метаморфизованной породе. Также как и метод палеомагнитных измерений, представленный метод изучения палеонапряжений позволяет составить, например, палеогеодинамическую карту региона.

\* \* \*

Главным результатом наших исследований является открытие новых явлений: линейной акустической анизотропии поглощения и деполяризации сдвиговых волн в породообразующих минералах и кристаллических породах. Упругая симметрия диопсида, кварца, апатита является более сложной, чем та, которая выявляется при их исследовании визуально, с помощью электромагнитных колебаний. Вместе с этим, до полного исследования упругих свойств даже группы наиболее распространенных породообразующих минералов еще далеко. Наше исследование – лишь начальный этап на этом пути.

## ЛИТЕРАТУРА

Авт. свид. № 1281993. Акустополарископ для измерения упругости образцов твердых сред / Горбацевич Ф.Ф., СССР, МКИ G01N 29/04. Бюлл. изобр., 1987. № 1.

Авт. свид. № 1434377. Способ сейсмической разведки геологического объекта / Горбацевич Ф.Ф., Шаров Н.В., СССР, МКИ G01V 1/00. Бюлл. изобр., 1988. № 40.

Адамеску Р.А., Гельд П.В., Митюшов Е.А. Анизотропия физических свойств металлов. М.: Металлургия, 1985. 136 с.

Акустополаризационные измерения характеристик анизотропии горных пород. Методические рекомендации. Составитель Горбацевич Ф.Ф. Апатиты: Изд. Кольского филиала АН СССР, 1985. 32 с.

Акустополариметрия и определение упругой симметрии горных пород / Методические рекомендации. Горбацевич Ф.Ф., Балаганский В.В., Иванова Н.Г. Апатиты: Изд-во КНЦ АН СССР, 1990. 83 с.

Александров К.С. Акустическая кристаллография // Проблемы современной кристаллографии. М.: Наука, 1975. С.327-345.

Александров К.С., Продайвода Г.Т. Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2000. 354 с.

Александров С.И. Деполяризация объемных упругих волн при рассеянии в случайно-неоднородной среде // Физика Земли, 1997, № 9. С.81-88.

Алешин Н.П., Вадковский Н.Н., Медведев В.А. О вводе сдвиговых волн в контролируемое изделие // Дефектоскопия, 1968, № 7. С.35-40.

Архейский комплекс в разрезе СГ-3. Апатиты: Кольский научный центр АН СССР, 1991. 186 с.

Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высш. шк., 1968. 512 с.

Беликов Б.П., Александров К.С., Рыжова Т.В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. М.: Наука, 1970. 276 с.

Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Изд-во ИЛ, 1957. 726 с.

Берри Л., Мейсон Б., Дитрих Р. Минералогия. М.: Мир, 1987. 592 с.

Богданов С.В. Определение упругих и пьезоэлектрических постоянных ромбических кристаллов акустическим методом // Акустический журнал, т.43, № 3, 1997. С.304-309.

Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. Изд. II, М.: Наука, 1973. 343 с.

Волков А.С., Гребенник В.С. Об использовании сдвиговых ультразвуковых волн с горизонтальной поляризацией при дефектоскопии изделий // Дефектоскопия. 1988. № 5. С.94-95.

Волкова Е.А. Поляризационные измерения. М.: Изд. Стандартов, 1974. 156 с.

Воче-Ламбинский архейский геодинамический полигон Кольского полуострова. Апатиты: Кольский научный центр АН СССР, 1991. 196 с.

Геологический словарь. Т.2. М.: Недра, 1973. 456 с.

Глозман А.И. Пьезокерамика. М.: Энергия, 1972. 288 с.

Гончаренко А.М., Грум-Гржимайло С.В., Федоров Ф.И. Поверхности светопоглощения кристаллов различных сингоний // Кристаллография, 1979, т.9, вып.4. С.589-598.

Горбацевич Ф.Ф. Акустополяризационный метод оценки упругой анизотропии горных пород. В кн.: Геофизические и геодинамические исследования на северо-востоке Балтийского щита. Апатиты: Изд. Кольского филиала АН СССР, 1982. С.112-124.

Горбацевич Ф.Ф. Акустополяризационный метод изучения анизотропии горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. № 11. С.74-79.

Горбацевич Ф.Ф. Анизотропия поглощения сдвиговых колебаний в горных породах. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990, № 5. С.70-79.

Горбацевич Ф.Ф. Акустополярископия горных пород. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 1995. 204 с.

Горбацевич Ф.Ф. Явление деполяризации сдвиговых волн в анизотропных гетерогенных средах // Физика Земли. 1998, № 6. С.83-90.

Горбацевич Ф.Ф., Абдрахимов М.З., Беляев С.К. Моделирование линейной акустической анизотропии поглощения в твердых средах. // Изв. РАН. Дефектоскопия. 1992, № 8. С.24-31.

Горбацевич Ф.Ф., Басалаев А.А. Опыт определения параметров палеонапряжений с применением акустополяризационного метода // Физика Земли. 1993, № 7. С.24-31.

Горбацевич Ф.Ф., Ильченко В.Л. О взаимном влиянии элементов упругой симметрии и линейной анизотропии поглощения на распространение сдвиговых колебаний в анизотропном твердом теле // Дефектоскопия. 1997, № 5. С.27-36.

Горбацевич Ф.Ф., Ильченко В.Л., Ковалевский М.В., Шпаченко А.К. Акустополярископия некоторых породобразующих минералов // Записки ВМО. 1999, № 4. С.88-92.

Горбацевич Ф.Ф., Медведев Р.В., Смирнов Ю.П. Упруго-анизотропные свойства керна по разрезу Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) // Физика Земли, 1997, № 4. С.3-12.

Горбацевич Ф.Ф., Розаев А.Е., Носова А.А., Наркисова В.В., Шамрай Г.И. Анизотропия упругих свойств и напряжений в разрезе Тырнаузской глубокой скважины (Северный Кавказ) // Геоэкология. 1997, № 6. С.54-66.

ГОСТ 21153.0-75. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний. М.: Изд-во Стандартов, 1975. 3 с.

- Делицын И.С. Структурообразование кварцевых пород. М.: Наука, 1985. 190 с.
- Добржинецкая Л.Ф. Структурно-метаморфическая эволюция Кольской серии (Балтийский щит). М.: Наука, 1978. 147 с.
- Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. М.: Наука, 1982. 424 с.
- Егоркина Г.В., Безгодков В.А. Изучение сейсмической анизотропии верхней части земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1987, № 4. С.28-29.
- Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.
- Жевандров Н.Д. Применение поляризованного света. М.: Наука, 1978. 176 с.
- Казаков А.Н. Динамический анализ микроструктурных ориентировок минералов. Л.: Наука, 1987. 272 с.
- Кожевников В.Н. Условия формирования структурно-метаморфических парагенезисов в докембрийских комплексах. Л.: Наука, 1982. 184 с.
- Кольская сверхглубокая. М.: Недра, 1984. 490 с.
- Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований. М.: МФ «Технонефтегаз», 1998. 260 с.
- Лямов В.Е. Поляризационные эффекты и анизотропия взаимодействия акустических волн в кристаллах. М.: Изд. МГУ, 1983. 224 с.
- Марков Г.А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. Л.: Наука, 1977. 213 с.
- Меркулов В.М. Поглощение ультразвуковых волн в горных породах в области частот 10-160 кгц // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1968, № 6. С.24-31.
- Най Дж. Физические свойства кристаллов. М.: Изд. ИЛ, 1960. 385 с.
- Невский М.В. Квазианизотропия скоростей сейсмических волн. М.: Наука, 1974. 179 с.
- Оболенцева И.Р. Сейсмическая гиротропия. В кн.: Исследования распространения сейсмических волн в анизотропных средах. Новосибирск: Наука, 1992. С.6-45.
- Петрашень Г.И. Распространение волн в анизотропных упругих средах. Л.: Наука, 1980. 280 с.
- Петрофизика. Справочник. М.: Недра, 1992. Т.1. 392 с.
- Продайвода Г.Т. Принципы симметрии в петрофизике // Геологический журнал. 1978, Т.38, № 4. С.61-69.
- Продайвода Г.Т. Петроакустический метод структурного анализа горных пород // Геофизический журнал. 1980, Т.2, № 1. С.88-91.

Продайвода Г.Т. Теория и методика комплексных исследований тензорных физических характеристик упорядоченных сред. Автореф. дисс. докт. физ.-мат наук. М.: ВНИИГЕОИНФОРМСИСТЕМ, 1991. 41 с.

Резяпов Г.И. Экспериментальное изучение причин аномальной поляризации поперечных волн, распространяющихся в ЗМС по вертикали. В кн.: Исследование распространения сейсмических волн в анизотропных средах. Новосибирск: Наука, 1992. С.104-111.

Розаев А.Е., Горбацевич Ф.Ф. Упруго-анизотропные свойства по разрезу Воротиловской глубокой скважины (ВГС) // Геоэкология, № 4, 1996. С.75-86.

Селезнев В.С., Соловьев В.М., Никитенко А.Б. Определение параметров сейсмической анизотропии земной коры в Западной Якутии // Геология и геофизика. 1986, № 8. С.90-98.

Силаева О.И., Делицын И.С. Скорость продольных волн в кристалле искусственного кварца // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1970, № 2. С.78-80.

Скавинский В.П., Юн Ен Дин. Об обменных отраженных PS- и X, Y, Z возбуждении и трехкомпонентной (x, y, z) регистрации. В кн.: Исследование распространения сейсмических волн в анизотропных средах. Новосибирск: Наука, 1992. С.111-117.

Скучик Е. Основы акустики. М.: Мир, 1976. Т.1, 534 с., Т.2, 546 с.

Смит Г. Драгоценные камни. М., Мир, 1980, 586 с.

Соболев В.С., Хлестаков В.В., Кепежинская К.Б. Об использовании ориентировки кварца для оценки температур минералообразований // ДАН СССР. 1964, т.154, № 6. С.1355-1358.

Треггер В.Е. Оптическое определение породообразующих минералов. М.: Недра, 1968. 197 с.

Тюлин В.Н. Введение в теорию излучения и рассеяния звука. М.: Наука, 1976. 254 с.

Урупов А.К., Лапин С.И. Скорости сейсмических волн в анизотропных слоисто-трещиноватых средах // Прикладная геофизика, 1972, Вып. 67. С.3-16.

Федоров Ф.И. Теория упругих волн в кристаллах. М.: Наука, 1965. 384 с.

Чесноков Е.М. Сейсмическая анизотропия верхней мантии Земли. М.: Наука, 1977. 144 с.

Шаскольская М.П. Кристаллография. М.: Изд. Высш. шк., 1976. 391 с.

Шерклифф У. Поляризованный свет. М.: Мир, 1965, 264 с.

Brace W.F. Orientation of anisotropic minerals in a stress field: discussion // Mem. Geol. Soc. Amer. 1960, V.79, № 9, pp.9-20.

Chandra S.Rai, Kenneth E.Hanson. Shear-Wave velocity anisotropy in sedimentary rocks: a laboratory study // Geophysics. 1988, Vol.53, № 6, pp.800-806.

Clark A.V., Mignogna P.B., Sanford R.J. Acoustoelastic measurements of stress and stress intensity factors around crack tips - *Ultrasonics*. 1983, № 3, pp.57-64.

Crampin S. Evaluation of anisotropy by shear-wave splitting // *Geophysics*. 1985, V.50, №. 1, pp.142-152.

D2845-83. Standard method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rocks. ASTM Committee on Standards, USA.

Farnell G.W. Elastic waves in trigonal crystals // *Can. J. Phys.* 1961, V.39, pp.65-80.

Gorbatsevich F.F. Non-linearity of strain in hard crystalline rocks // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 1996, Vol.33, № 1, pp.83-91.

Gorbatsevich, F.F. Acoustic polarization method for determining elastic symmetry and constants of anisotropy in solid media // *Ultrasonics*. 1999, № 37, pp.309-319.

Harder S. Analysis of elastic symmetry from velocity measurements with application to dunite and bronzitite // *J.G.R.* 1988, V.94, № 3, pp.469-478.

Hess H.H. Seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans // *Nature*. 1964, V.203, № 4945, pp.629-631.

Hill R. The elastic behaviour of a crystalline aggregate // *Proc. Phys. Soc.* 1952, A.65, № 5, pp.349-354.

Lucas R. et al. Mesure au moyen d'ondes ultrasonores polarisées des variations des constantes élastiques dans les solides soumis à des contraintes // *Comptes rendus de l'Académie des sciences*. 1961, V.252, № 25, pp.3937-3939.

MacSkimin, H.J. Ultrasonic measurements techniques // *Journ. Acoust. Soc. Amer.* July 1950, № 4, pp.413-418.

Musgrave M.J.P., Markham M.F. Features of the elastic wave surface for a zinc crystal // *Proc. Phys. Soc.* 1961, Vol.77, No 2, pp.335-336.

Proctor, T.M. A passive analyzer for ultrasonic shear waves // *Journ. Acoust. Soc. Amer.* 1971, V.50, № 5, pp.1379-1381.

Raitt R.W., Shor G.G., Jr., Francis T.J.G. and Morris G.B. Anisotropy of the Pacific upper mantle // *J.G.R.* 1969, V.74, № 12, pp.3095-3109.

Robin, P.-Y.F. Theory of metamorphic segregation and related processes // *Geochim. & Cosmochim. acta*. 1979, V.43, № 10, pp.1587-1600.

Tien-When Lo, Karl B. Coyner, Nafi N. Toksoz. Experimental determination of elastic anisotropy of Berea sandstone, Chicopee shale and Chelmsford granite // *Geophysics*. 1986, V. 51, № 1, pp.164-171.

Tillman S.E., Bennet H.F. A sonic method for petrographic analysis // *J.G.R.* 1973, V.78, № 35, pp.8463-8469.

Thomsen L. Weak elastic anisotropy // *Geophysics*. 1986, V.51, № 10, pp.1-37.

Voigt W. *Lehrbuch der Kristallphysik*. Leipzig: Verl. von B.G. Teubner, 1910. 964 s.

**ИНСТРУКЦИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И ПОСТРОЕНИЯ  
АКУСТОПОЛЯРИГРАММ НА ПЕРСОНАЛЬНОМ КОМПЬЮТЕРЕ  
(ПК)**

1. Включить ПК и загрузить программу qBASIC.
2. После загрузки qBasic выбрать команду Open.
3. Из меню файлов выбрать файл Ud2-12cm если измерения выполнены на приборе УД2-12. Появятся строчки компьютерной программы на языке qBASIC для ввода амплитуд, расчета и построения трех пар акустополяриграмм (ВП и ВС) при проведении акустополярископии на гранях кубического образца.
4. Проверить работу программы, для чего нажать клавишу F5. По программе на экране должны быть построены 3 акустополяриграммы, выведено изображение кубика с обозначением его осей и граней. Тремя последовательными нажатиями клавиши Enter программа возвращается в режим редактирования, на экране появляются строчки программы.
5. Найти строку программы, начинающуюся с 30 DATA и после пробела набрать все 36 значений новых данных по грани 1-1' - амплитуд  $A_{1\text{ВП}}$ , при параллельных векторах поляризации.
6. Найти строку программы 40 DATA, набрать 36 значений  $A_{2\text{ВП}}$ .
7. В строку 60 DATA набрать 36 значений  $A_{1\text{ВС}}$ , при скрещенных векторах поляризации.
8. В строку 70 DATA набрать 36 значений  $A_{2\text{ВС}}$ .
9. Найти строку программы, начинающуюся с 1030 DATA и набрать 36 значений  $A_{1\text{ВП}}$  по грани 2-2'.
10. В строке 1040 DATA набрать  $A_{2\text{ВП}}$ .
11. В строке 1060 DATA набрать  $A_{1\text{ВС}}$ .
12. В строке 1070 DATA набрать  $A_{2\text{ВС}}$ .
13. Так же, как и в п.5-8, выполнить все операции в строках 2030, 2040, 2060, 2070 для данных по грани 3-3'.
14. Найти строку 442 и вставить в пространство между кавычками " \_\_\_ " данные об образце.
15. Осуществить поворот акустополяриграммы, в соответствии с положением образца на столике акустополярископа. Для этого:
  - 1) Найти строку 312 и внести необходимый угол  $G =$  для грани 1.
  - 2) Найти строку 1312 и внести необходимый угол  $G =$  для грани 2.
  - 3) Найти строку 2312 и внести необходимый угол  $G =$  для грани 3.
16. Проверить правильность выполнения построения трех пар акустополяриграмм, для чего нажать клавишу F5.

17. Выйти в меню, нажав клавишу Alt, выбрать команду Save As, нажать Enter. В открывшемся окне набрать название нового файла в котором будут сохранены данные.
18. Выйти из qBasic, для чего, нажав на клавишу Alt, выбрать из меню команду File, а затем команду Exit, нажать Enter.

Ниже приведена компьютерная программа на языке qBASIC для ввода амплитуд, расчета и построения трех пар акустополяриграмм (ВП и ВС) при проведении акустополярископии на гранях кубического образца.

```
5 KEY 7, "EDIT "  
10 REM PROGRAMM IS FIT FOR CASE - MAXIMUM DECIBEL-MAXIMUM  
AMPLITUDE  
15 PRINT "FOR THE DEVICE UD 2-12"  
20 DIM A(100), X(100), B(100), Y(100), P(100), S(100), E(100),  
R(100), T(100), U(100), D(100), J(100), L(100)  
30 DATA  
28,27,28,27,24,23,23,23,24,25,25,26,25,26,26,27,28,29,28,26,23,  
27,31,29,28,27,27,28,29,29,29,27,27,26,27,27  
40 DATA  
25,27,25,23,21,20,20,21,22,24,25,25,25,26,26,27,28,29,29,27,25,  
27,28,26,24,24,25,26,27,28,27,26,25,26,26,27  
60 DATA  
26,23,22,23,26,24,19,22,29,25,23,23,24,27,24,21,19,27,24,23,23,  
24,26,26,23,22,21,25,27,22,24,22,22,22,24,24  
70 DATA  
26,24,25,26,24,20,15,23,28,24,22,21,23,26,20,19,21,25,22,21,21,  
22,22,27,22,21,20,23,25,23,23,21,22,21,23,23  
90 N = 36  
100 FOR I = 1 TO N: READ A(I): NEXT I  
105 FOR I = 1 TO N: READ X(I): NEXT I  
110 FOR I = 1 TO N: LET P(I) = (A(I) + X(I)) / 2: NEXT I  
113 FOR I = 1 TO N: READ B(I): NEXT I  
117 FOR I = 1 TO N: READ Y(I): NEXT I  
119 FOR I = 1 TO N: LET S(I) = (B(I) + Y(I)) / 2: NEXT I  
120 REM FOR I=1 TO 36:Z=10*(I-1): PRINT TAB(1),,"L=";Z;  
125 V = P(1)  
130 FOR I = 2 TO N  
140 IF V > P(I) THEN 160  
150 LET V = P(I)  
160 NEXT I  
162 PRINT TAB(10); , "APMAX="; V;  
165 LET Q = S(1)  
170 FOR I = 2 TO N  
175 IF Q > S(I) THEN 190  
180 LET Q = S(I)  
190 NEXT I  
195 PRINT TAB(40); , "ASMAX="; Q;  
200 W = V: IF Q > V THEN W = Q  
205 PRINT TAB(25); , "AMAX="; W;  
210 REM LPRINT "!-------!-----!-----!-----!"
```



```

220 FOR I = 1 TO N
230 P = ABS(A(I) - W): P1 = 1 / (10 ^ (P / 20)): P(I) = P1
240 S = ABS(B(I) - W): S1 = 1 / (10 ^ (S / 20)): S(I) = S1
245 Z = 10 * (I - 1)
250 M = I * 10
255 REM PRINT TAB(1),,"L=";Z; TAB(20),"AOP=";P1;
TAB(50),"AOS=";S1
260 REM LPRINT USING "      ###          ##.#          ##.#
270 NEXT I
280 SCREEN 11: CLS : KEY OFF
290 X0 = 105: Y0 = 240: R = 80
300 I = 1
310 A = (I - 2) * 3.141592653# / 18
312 G = 0
314 K = G * 3.141592653# / 180
320 S = SIN(A + K): C = COS(A + K)
340 XA = X0 + R * C * P(I)
350 YA = Y0 - R * S * P(I)
360 XB = X0 + R * C * S(I)
370 YB = Y0 - R * S * S(I)
380 I = 36
382 A = (I - 1) * 3.141592653# / 18
386 S = SIN(A + K): C = COS(A + K)
390 XC = X0 + R * C * P(I)
400 YC = Y0 - R * S * P(I)
410 XD = X0 + R * C * S(I)
420 YD = Y0 - R * S * S(I)
430 LINE (XA, YA)-(XC, YC), 3
440 LINE (XB, YB)-(XD, YD), 3, , 22211
442 PRINT TAB(2); "Journal No., page, sample No., name of rock,
depth, deposit"
445 LINE (5, 240)-(15, 240), 1: LINE (205, 240)-(215, 240), 1:
LINE (105, 140)-(105, 150), 1: LINE (105, 330)-(105, 340), 1
450 REM S$=INPUT$(1)
470 FOR I = 1 TO 36
480 A = (I - 1) * 3.141592653# / 18
484 K = G * 3.141592653# / 180
490 S = SIN(A + K): C = COS(A + K)
500 X = X0 + R * C * P(I)
510 Y = Y0 - R * S * P(I)
520 IF I > 0 THEN LINE (XA, YA)-(X, Y), 3
530 XA = X: YA = Y
570 NEXT I
575 LINE (205, 240)-(215, 240), 1: LINE (415, 240)-(425, 240),
1: LINE (315, 140)-(315, 150), 1: LINE (315, 330)-(315, 340), 1
600 FOR I = 1 TO 36
610 A = (I - 1) * 3.141592653# / 18
620 S = SIN(A + K): C = COS(A + K)
630 X = X0 + R * C * S(I)
640 Y = Y0 - R * S * S(I)
650 IF I > 0 THEN LINE (XB, YB)-(X, Y), 2, , 22222
660 XB = X: YB = Y
700 NEXT I

```

```

702 LINE (415, 240)-(425, 240), 1: LINE (615, 240)-(625, 240),
1: LINE (525, 140)-(525, 150), 1: LINE (525, 330)-(525, 340), 1
1030 DATA
36,38,40,44,44,44,43,41,39,40,45,46,48,48,48,47,44,38,40,42,45,
46,47,47,45,43,41,41,45,47,48,49,48,47,45,40
1040 DATA
40,44,44,47,48,47,45,43,40,43,47,48,49,49,48,47,43,38,40,44,46,
48,48,47,45,43,41,42,48,50,50,50,50,48,45,39
1060 DATA
47,46,42,37,31,38,43,46,47,47,46,43,37,30,38,44,46,47,47,46,47,
37,31,38,44,47,48,47,46,42,36,30,39,44,46,47
1070 DATA
47,46,44,37,32,40,44,46,47,47,46,42,36,32,41,46,48,48,48,47,43,
36,34,41,45,47,48,48,46,42,35,32,40,45,47,47
1090 N = 36
1100 FOR I = 1 TO N: READ A(I): NEXT I
1105 FOR I = 1 TO N: READ X(I): NEXT I
1110 FOR I = 1 TO N: LET P(I) = (A(I) + X(I)) / 2: NEXT I
1113 FOR I = 1 TO N: READ B(I): NEXT I
1117 FOR I = 1 TO N: READ Y(I): NEXT I
1119 FOR I = 1 TO N: LET S(I) = (B(I) + Y(I)) / 2: NEXT I
1125 V = P(1)
1130 FOR I = 2 TO N
1140 IF V > P(I) THEN 1160
1150 LET V = P(I)
1160 NEXT I
1165 LET Q = S(1)
1170 FOR I = 2 TO N
1175 IF Q > S(I) THEN 1190
1180 LET Q = S(I)
1190 NEXT I
1200 W = V: IF Q > V THEN W = Q
1220 FOR I = 1 TO N
1230 P = ABS(A(I) - W): P1 = 1 / (10 ^ (P / 20)): P(I) = P1
1240 S = ABS(B(I) - W): S1 = 1 / (10 ^ (S / 20)): S(I) = S1
1245 Z = 10 * (I - 1)
1250 M = I * 10
1270 NEXT I
1290 X0 = 315: Y0 = 240: R = 80
1300 I = 1
1310 A = (I - 2) * 3.141592653# / 18
1312 G = 0
1314 K = G * 3.141592653# / 180
1320 S = SIN(A + K): C = COS(A + K)
1340 XA = X0 + R * C * P(I)
1350 YA = Y0 - R * S * P(I)
1360 XB = X0 + R * C * S(I)
1370 YB = Y0 - R * S * S(I)
1380 I = 36
1382 A = (I - 1) * 3.141592653# / 18
1386 S = SIN(A + K): C = COS(A + K)
1390 XC = X0 + R * C * P(I)
1400 YC = Y0 - R * S * P(I)

```

```

1410 XD = X0 + R * C * S(I)
1420 YD = Y0 - R * S * S(I)
1430 LINE (XA, YA)-(XC, YC), 3
1440 LINE (XB, YB)-(XD, YD), 3, , 22211
1470 FOR I = 1 TO 36
1480 A = (I - 1) * 3.141592653# / 18
1484 K = G * 3.141592653# / 180
1490 S = SIN(A + K): C = COS(A + K)
1500 X = X0 + R * C * P(I)
1510 Y = Y0 - R * S * P(I)
1520 IF I > 0 THEN LINE (XA, YA)-(X, Y), 3
1530 XA = X: YA = Y
1570 NEXT I
1600 FOR I = 1 TO 36
1610 A = (I - 1) * 3.141592653# / 18
1620 S = SIN(A + K): C = COS(A + K)
1630 X = X0 + R * C * S(I)
1640 Y = Y0 - R * S * S(I)
1650 IF I > 0 THEN LINE (XB, YB)-(X, Y), 2, , 22211
1660 XB = X: YB = Y
1700 NEXT I
2030 DATA
40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,
40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40
2040 DATA
40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,
40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40
2060 DATA
34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,
34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34
2070 DATA
34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,
34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34,34
2090 N = 36
2100 FOR I = 1 TO N: READ A(I): NEXT I
2105 FOR I = 1 TO N: READ X(I): NEXT I
2110 FOR I = 1 TO N: LET P(I) = (A(I) + X(I)) / 2: NEXT I
2113 FOR I = 1 TO N: READ B(I): NEXT I
2117 FOR I = 1 TO N: READ Y(I): NEXT I
2119 FOR I = 1 TO N: LET S(I) = (B(I) + Y(I)) / 2: NEXT I
2125 V = P(1)
2130 FOR I = 2 TO N
2140 IF V > P(I) THEN 2160
2150 LET V = P(I)
2160 NEXT I
2165 LET Q = S(1)
2170 FOR I = 2 TO N
2175 IF Q > S(I) THEN 2190
2180 LET Q = S(I)
2190 NEXT I
2200 W = V: IF Q > V THEN W = Q
2220 FOR I = 1 TO N
2230 P = ABS(A(I) - W): P1 = 1 / (10 ^ (P / 20)): P(I) = P1

```

```

2240 S = ABS(B(I) - W): S1 = 1 / (10 ^ (S / 20)): S(I) = S1
2245 Z = 10 * (I - 1)
2250 M = I * 10
2270 NEXT I
2290 X0 = 525: Y0 = 240: R = 80
2300 I = 1
2310 A = (I - 2) * 3.141592653# / 18
2312 G = 0
2314 K = G * 3.141592653# / 180
2320 S = SIN(A + K): C = COS(A + K)
2340 XA = X0 + R * C * P(I)
2350 YA = Y0 - R * S * P(I)
2360 XB = X0 + R * C * S(I)
2370 YB = Y0 - R * S * S(I)
2380 I = 36
2382 A = (I - 1) * 3.141592653# / 18
2386 S = SIN(A + K): C = COS(A + K)
2390 XC = X0 + R * C * P(I)
2400 YC = Y0 - R * S * P(I)
2410 XD = X0 + R * C * S(I)
2420 YD = Y0 - R * S * S(I)
2430 LINE (XA, YA)-(XC, YC), 3
2440 LINE (XB, YB)-(XD, YD), 3, , 22211
2470 FOR I = 1 TO 36
2480 A = (I - 1) * 3.141592653# / 18
2484 K = G * 3.141592653# / 180
2490 S = SIN(A + K): C = COS(A + K)
2500 X = X0 + R * C * P(I)
2510 Y = Y0 - R * S * P(I)
2520 IF I > 0 THEN LINE (XA, YA)-(X, Y), 3
2530 XA = X: YA = Y
2570 NEXT I
2600 FOR I = 1 TO 36
2610 A = (I - 1) * 3.141592653# / 18
2620 S = SIN(A + K): C = COS(A + K)
2630 X = X0 + R * C * S(I)
2640 Y = Y0 - R * S * S(I)
2650 IF I > 0 THEN LINE (XB, YB)-(X, Y), 2, , 22211
2660 XB = X: YB = Y
2700 NEXT I
2705 REM S$ = INPUT$(1)
3010 X = 50: Y = 420: x - not less 50. y - not more 499
3020 SCREEN 11: LINE (X, Y)-(X, Y - 25): LINE (X, Y)-(X + 30,
Y)
3030 LINE (X, Y - 25)-(X + 30, Y - 25): LINE (X + 30, Y - 25)-
(X + 30, Y)
3040 LINE (X, Y - 25)-(X + 15, Y - 37.5): LINE (X + 30, Y -
25)-(X + 45, Y - 37.5)
3050 LINE (X + 30, Y)-(X + 45, Y - 12.5)
3060 LINE (X + 12.5, Y - 37.5)-(X + 45, Y - 37.5): LINE (X +
45, Y - 37.5)-(X + 45, Y - 12.5)
3070 LINE (X, Y)-(X + 15, Y - 12.5), , , 22211
3080 LINE (X + 15, Y - 12.5)-(X + 45, Y - 12.5), , , 22211

```

```

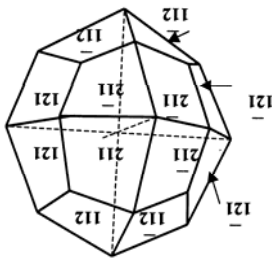
3090 LINE (X + 15, Y - 12.5)-(X + 15, Y - 37.5), , , 22211
3100 LOCATE 22, 15: PRINT "[3]": LOCATE 15, 1: PRINT "[2']"
3110 LOCATE 15, 27: PRINT "[3]": LOCATE 9, 41: PRINT "[1]"
3115 LOCATE 9, 67: PRINT "[1]": LOCATE 15, 78: PRINT "[2]"
3117 LOCATE 10, 5: PRINT "1": LOCATE 10, 31: PRINT "2"
3119 LOCATE 10, 59: PRINT "3"
3120 CIRCLE (X - 14, Y - 270), 14: CIRCLE (X + 194, Y - 270),
14: CIRCLE (X + 418, Y - 270), 14
3130 LINE (X + 7, Y - 12.5)-(X - 20, Y - 7)
3140 LINE (X + 38, Y - 25)-(X + 60, Y - 25)
3150 LINE (X + 30, Y - 29)-(X + 30, Y - 49)
3160 LOCATE 27, 3: PRINT "[3]": LOCATE 23, 10: PRINT "[1]"
3170 LOCATE 26, 15: PRINT "[2]"
3200 REM LOCATE 1,1:PRINT "INPUT DATA: h1, tDP1, tDS1, tDOP1,
tDOS12, tDOS13"
3210 DATA 10,10,10,20,20,20
3220 READ H1, TDP1, TDS1, TDOP1, TDOS12, TDOS13
3230 V11 = (H1) / (TDOP1 - TDP1)
3240 V12 = (H1) / (TDOS12 - TDS1)
3250 V13 = (H1) / (TDOS13 - TDS1)
3310 DATA 10,10,10,20,20,20
3320 READ H2, TDP2, TDS2, TDOP2, TDOS21, TDOS23
3330 V22 = (H2) / (TDOP2 - TDP2)
3340 V21 = (H2) / (TDOS21 - TDS2)
3350 V23 = (H2) / (TDOS23 - TDS2)
3410 DATA 10,10,10,20,20,20
3420 READ H3, TDP3, TDS3, TDOP3, TDOS31, TDOS32
3430 V33 = (H3) / (TDOP3 - TDP3)
3440 V31 = (H3) / (TDOS31 - TDS3)
3450 V32 = (H3) / (TDOS32 - TDS3)
3580 LOCATE 24, 43: PRINT USING "#.####"; V11
3590 LOCATE 24, 50: PRINT USING "#.####"; V12
3600 LOCATE 24, 57: PRINT USING "#.####"; V13
3610 LOCATE 25, 43: PRINT USING "#.####"; V21
3620 LOCATE 25, 50: PRINT USING "#.####"; V22
3630 LOCATE 25, 57: PRINT USING "#.####"; V23
3640 LOCATE 26, 43: PRINT USING "#.####"; V31
3650 LOCATE 26, 50: PRINT USING "#.####"; V32
3660 LOCATE 26, 57: PRINT USING "#.####"; V33
4180 S$ = INPUT$(1)
4190 CLS
4200 SCREEN 2: SCREEN 0

```

**КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ МИНЕРАЛОВ**

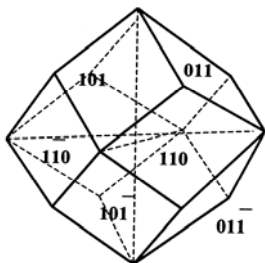
(Составитель Н.Е. Козлова)

**АНАЛЬЦИМ**



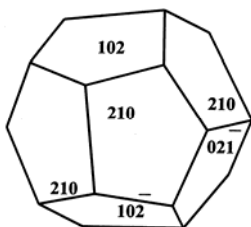
$\text{Na}[\text{AlSi}_2\text{O}_6]\text{H}_2\text{O}$   
Сингония: кубическая  
Пространственная группа –  $\text{Ia}\bar{3}\text{d}$   
Спайность: плохая по  $\{001\}$   
Цвет: белый, розовый, серый  
Оптические свойства: изотропный,  
бесцветный

**ГРАНАТ**



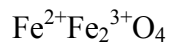
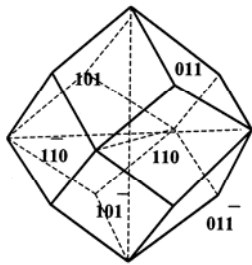
(АЛЬМАНДИН, ГРОССУЛЯР, ПИРОП)  
 $(\text{Fe}^{2+}, \text{Ca}, \text{Mg})_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$   
Сингония: кубическая  
Пространственная группа –  $\text{Ia}\bar{3}\text{d}$   
Спайность: отсутствует  
Цвет: белый, розовый, желтый, бурый,  
зеленый, коричневый, черный  
Оптические свойства: изотропный (часто  
аномально анизотропный)

**ПИРИТ**



$\text{FeS}_2$   
Сингония: кубическая  
Пространственная группа –  $\text{Pa}\bar{3}$   
Спайность: по  $\{001\}$  неясная  
Цвет: латунно-желтый  
Оптические свойства: изотропный  
(часто анизотропный – от голубовато-  
зеленого до оранжево-красного в  
скрещенных николях),  
непрозрачный

## МАГНЕТИТ



Сингония: кубическая

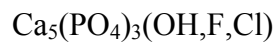
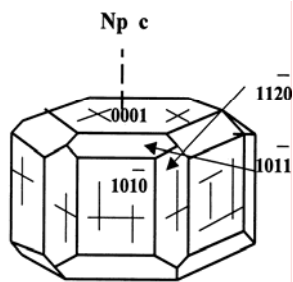
Пространственная группа –  $Fd\bar{3}m$

Спайность: отсутствует, встречается  
отдельность по  $\{111\}$

Цвет: черный

Оптические свойства: изотропный,  
непрозрачный

## АПАТИТ



Сингония: гексагональная

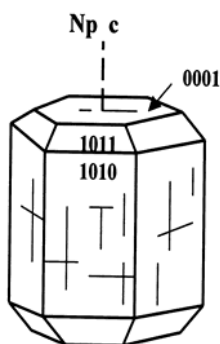
Пространственная группа –  $C6_3/m$

Спайность: по  $\{0001\}$  и  
 $\{1010\}$  заметная

Цвет: белый, голубой, зеленый, бурый,  
желтый

Оптические свойства:  
анизотропный, одноосный  
отрицательный, бесцветный -  
серо-черный (от включений)

## НЕФЕЛИН



Сингония: гексагональная

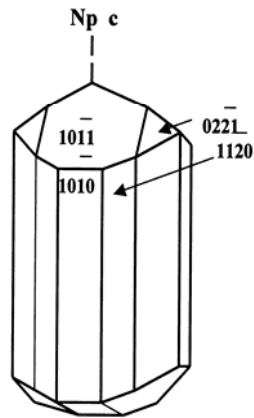
Пространственная группа –  $R\bar{6}_3$

Спайность: по  $\{1010\}$  неясная

Цвет: бесцветный, белый, серый

Оптические свойства:  
анизотропный, одноосный  
отрицательный, бесцветный,  
плеохроизм отсутствует

## ТУРМАЛИН



$Na(Mg,Fe,Mn,Li,Al)_3Al_6[Si_6O_{18}](BO_3)_3(OH,F)_4$

Сингония: тригональная

Пространственная группа –  $R3m$

Спайность: плохая по  $\{1120\}$  и  $\{1011\}$

Цвет: черный, голубой, зеленый, красный

Оптические свойства:

анизотропный, двуосный

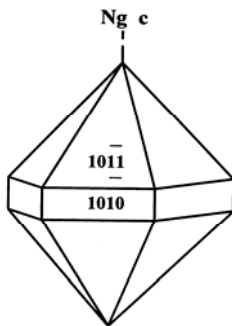
отрицательный, голубовато-

желтый, зеленый, бесцветный,

плеохроизм интенсивный в

перечисленных тонах

## КВАРЦ



$SiO_2$

Сингония: тригональная,

Пространственная группа –  $R3_121$

Спайность: отсутствует

Цвет: бесцветный,

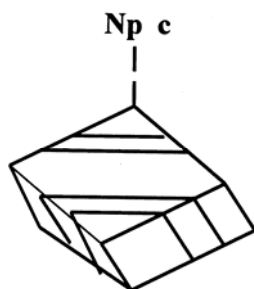
белый, изменчивый

(зеленый, черный,

серый, фиолетовый,

желтый и т.д.)

## КАЛЬЦИТ



$CaCO_3$

Сингония: тригональная

Пространственная группа –  $R3c$

Спайность: совершенная по  $\{1011\}$

Цвет: белый, желтоватый, розоватый,

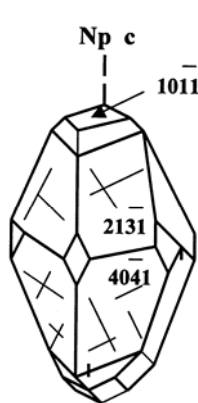
зеленоватый

Оптические свойства: анизотропный,

двуосный отрицательный, бесцветный,

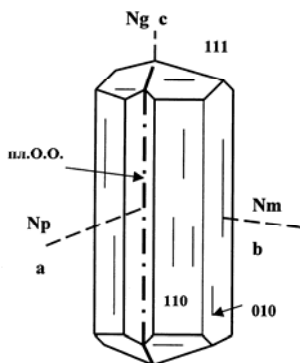
плеохроизм отсутствует





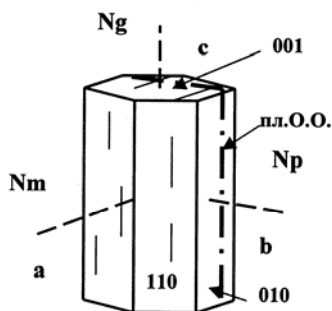
### АРАГОНИТ

CaCO<sub>3</sub>  
 Сингония: ромбическая  
 Пространственная группа – Pmcn  
 Спайность: ясная по {010}  
 Цвет: бесцветный, белый  
 Оптические свойства: анизотропный, двуосный положительный, бесцветный, плеохроизм отсутствует



### НАТРОЛИТ

Na<sub>2</sub>[Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub>]2H<sub>2</sub>O  
 Сингония: ромбическая (псевдотетрагональная)  
 Пространственная группа - Fdd2  
 Спайность: По {110} и {110} очень хорошая  
 Цвет: бесцветный, серый, розовый, красный  
 Оптические свойства: анизотропный, двуосный положительный, бесцветный, плеохроизм отсутствует

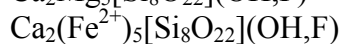
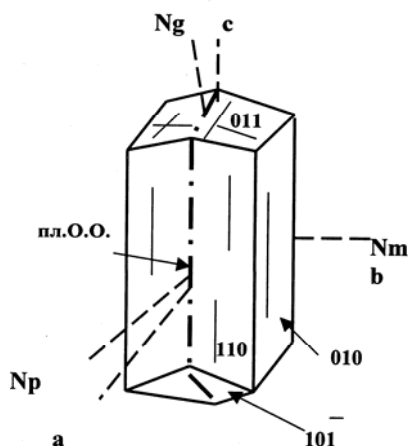


### СТАВРОЛИТ

(Fe<sup>2+</sup>,Mg)<sub>2</sub>(Al,Fe<sup>3+</sup>)<sub>9</sub>O<sub>6</sub>[SiO<sub>4</sub>]<sub>4</sub>(O,OH)<sub>2</sub>  
 Сингония: моноклинная (псевдоромбическая)  
 Пространственная группа – C2/m  
 Спайность: по {010} умеренная  
 Цвет: темно-бурый, красновато-бурый, желто-бурый  
 Оптические свойства: анизотропный, двуосный положительный, бесцветный, золотисто-желтый, плеохроизм – от бесцветного до золотисто-желтого

## АМФИБОЛЫ

### **ТРЕМОЛИТ - ФЕРРОАКТИНОЛИТ**



Сингония: моноклинная

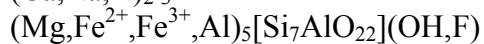
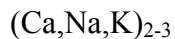
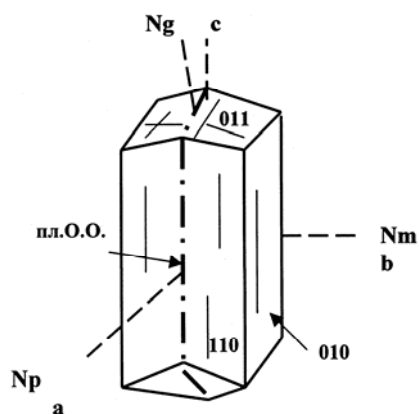
Пространственная группа – C2/m

Спайность: по {110} – хорошая,  
отдельность по {100}

Цвет: бесцветный, зеленый, темно-  
зеленый

Оптические свойства: анизотропные,  
двусные отрицательные, тремолит -  
бесцветный, актинолит, ферроактинолит –  
светло-зеленые, темно-зеленые,  
плеохроизм от светло-зеленого до темно-  
зеленого.

### **ОБЫКНОВЕННАЯ РОГОВАЯ ОБМАНКА**



Сингония: моноклинная

Пространственная группа – C2/m

Спайность: по {110}, отдельность  
по {100} и {001}

Цвет: зеленый, темно-зеленый, черный

Оптические свойства:

анизотропный, двусный

отрицательный, светло-зеленый,

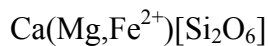
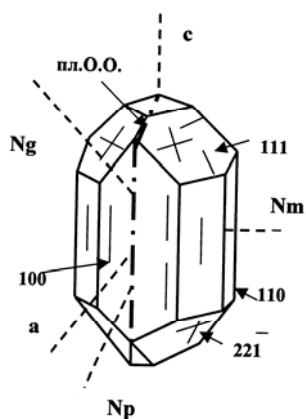
зеленый, плеохроизм – зеленый

(различной интенсивности) –

желто-зеленый

## МОНОКЛИННЫЕ ПИРОКСЕНЫ

### *ДИОПСИД – ГЕДЕНБЕРГИТ*



Сингония: моноклиная

Пространственная группа – C2/c

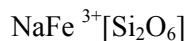
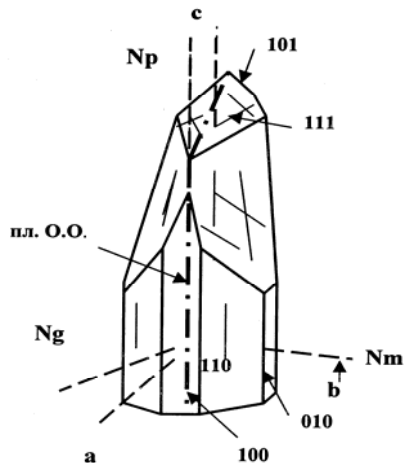
Спайность: по {110} хорошая,  
отдельность по {100} и {010}

Цвет: белый, светло и темно-зеленый

Оптические свойства: анизотропный,  
двуосный, положительный, бесцветный  
- буровато-зеленый, плеохроизм:

диопсид – от светло-зеленого до светло-  
буровато-зеленого; геденбергит – от  
светло-зеленого до желто-зеленого

### *ЭГИРИН*



Сингония: моноклиная

Пространственная группа – C2/c

Спайность: по {110} хорошая,  
отдельность по {100}

Цвет: от темно-зеленого до  
зеленовато-черного

Оптические свойства: анизотропный,  
двуосный отрицательный, светло-  
зеленый, темно-зеленый, желтовато-  
зеленый, плеохроизм от изумрудно-  
зеленого до желтовато-зеленого

## ЩЕЛОЧНЫЕ ПОЛЕВЫЕ ШПАТЫ

### **МИКРОКЛИН**



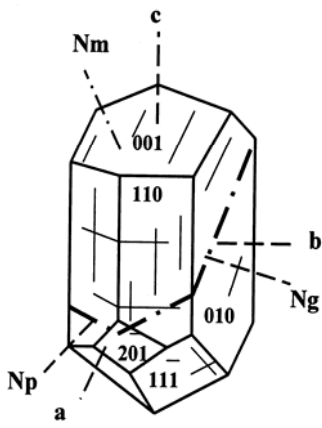
*Сингония: триклинная*

Пространственная группа – C1

Спайность: совершенная по {110},  
хорошая по {010}

Цвет: бесцветный, белый, розовый

Оптические свойства: анизотропный,  
двуосный отрицательный, бесцветный  
плеохроизм отсутствует



### **ОРТОКЛАЗ**



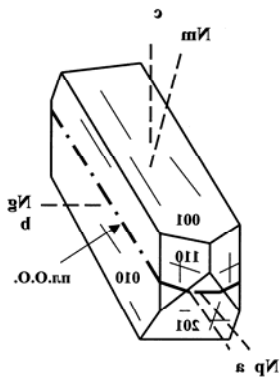
*Сингония: моноклинная*

Пространственная группа – C2/m

Спайность: совершенная по {110},  
хорошая по {010}

Цвет: бесцветный, белый, розовый

Оптические свойства: анизотропный,  
двуосный отрицательный, плеохроизм  
отсутствует



### **СПОДУМЕН**



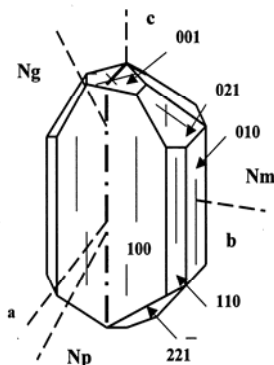
*Сингония: моноклинная*

Пространственная группа - C2/c

Спайность: по {110} хорошая,  
отдельность по {100} и {010}

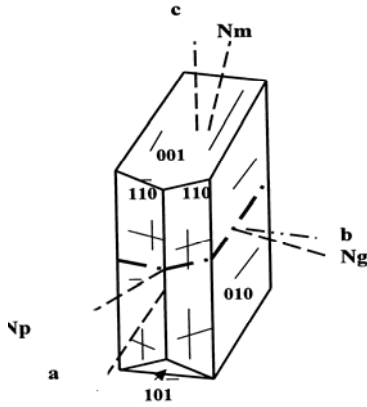
Цвет: бесцветный, сероватый,  
аметистовый, зеленый,  
желтоватый, изумрудно-  
зеленый, лиловый

Оптические свойства: анизотропный,  
двуосный положительный, бесцветный,  
плеохроизм отсутствует



## ПЛАГИОКЛАЗЫ

### *АЛЬБИТ (Са 0-10%)*



Сингония: триклинная

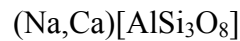
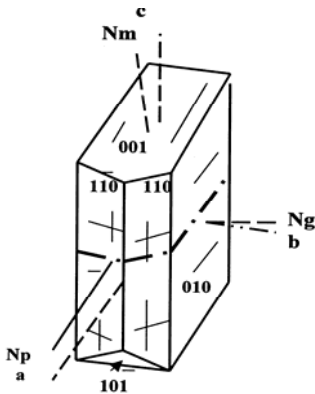
Пространственная группа – C1

Спайность: по {001} совершенная, по {010} – ясная, по {110} – слабо выраженная.

Цвет: бесцветный, белый

Оптические свойства: анизотропный, двусный, положительный, бесцветный, плеохроизм отсутствует

### *ОЛИГОКЛАЗ (Са 10-30%)*



Сингония: триклинная

Пространственная группа – C1

Спайность: по {001} совершенная, по {010} – ясная, по {110} – слабо выраженная.

Цвет: бесцветный, белый

Оптические свойства: анизотропный, двусный, отрицательный, бесцветный, плеохроизм отсутствует

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	8
1. Физические основы метода акустополаризационных измерений.....	11
1.1. Распространение упругих колебаний в поперечно-изотропной среде.....	11
1.2. Разность фазы и фазовый сдвиг в волне сдвиговых колебаний...	13
1.3. Изменения огибающей стационарных сдвиговых колебаний.....	17
1.4. Особенности круговых диаграмм при параллельных и скрещенных векторах поляризации.....	18
1.5. Характер круговых диаграмм при временном разделении сдвиговых импульсов.....	21
2. Эффект линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП).....	25
2.1. Модели сред, проявляющих ЛААП.....	25
2.2. Изотропная среда.....	26
2.3. Поперечно-изотропная среда.....	28
2.4. Наблюдения ЛААП на модельных средах.....	31
2.5. Наблюдения ЛААП на модели с угловым несогласием с элементами упругой симметрии.....	35
3. Явление деполяризации сдвиговых волн (ДСВ) в анизотропных гетерогенных средах.....	42
3.1 Теоретические аспекты явления деполяризации сдвиговых волн.....	42
3.2. Моделирование процесса распространения сдвиговых волн через анизотропные пластины.....	45
4. Аппаратура для акустополаризационных определений.....	49
4.1. Особенности определения величин скорости распространения упругих колебаний в анизотропных средах.....	49
4.2. Требования к приборам и материалам.....	54
4.3. Конструкция акустополарископа с поворотной платформой.....	57
4.4. Комбинированные преобразователи для излучения и приема продольных и сдвиговых колебаний.....	62
5. Порядок проведения акустополарископии.....	66
5.1. Общие требования к измерениям.....	66
5.2. Юстировка акустополарископа.....	67
5.3. Проведение акустополарископии.....	69
5.4. Определение величин скорости распространения упругих колебаний.....	72
6. Определение типа симметрии среды и констант упругости.....	75

	Стр.
6.1. Способы определения типа симметрии среды и констант упругости .....	75
6.2. Анализ положения элементов симметрии в средах ромбической симметрии.....	77
6.3. Расчет констант упругости орторомбических сред и сред более высоких типов симметрии.....	79
6.4. Критерии выделения слабоанизотропных сред.....	83
6.5. Интегральная оценка упругой анизотропии кристаллических пород.....	85
7. Акустополярископия породообразующих минералов.....	88
7.1. Особенности упругих свойств породообразующих минералов...	88
7.2. Минералы высшей и средней сингоний.....	89
7.3. Минералы низших сингоний.....	100
8. Акустополярископия моно- и полиминеральных пород.....	108
8.1. Типы проявления эффекта линейной акустической анизотропии поглощения в кристаллических породах.....	108
8.2. Взаимное влияние упругой анизотропии и линейной акустической анизотропии поглощения при угловом несогласии их элементов симметрии.....	109
8.3. Экспериментальные результаты регистрации явления ДСВ в горных породах.....	113
8.4. Принцип соответствия для метаморфизованных пород.....	117
8.5. Оценка параметров палеонапряжений в массивах метаморфизованных пород.....	120
Заключение.....	125
Литература.....	130
Приложение 1. Инструкция для обработки и построения акустополяриграмм на персональном компьютере (ПК).....	135
Приложение 2. Кристаллографические и оптические характеристики некоторых минералов.....	142

## CONTENTS

	Page
<b>PREFACE</b> .....	8
1. Physical fundamentals of the acoustopolarization measurement method.....	11
1.1.1. Propagation of elastic waves in a transverse-isotropic medium...	11
1.1.2. Phase difference and phase shift in the shear wave.....	13
1.1.3. Variation of the envelope of the stationary shear waves.....	17
1.1.4. Peculiarities of the circle diagrams at parallel and crossed polarization vectors.....	18
1.1.5. Pattern of circle diagrams at temporal separation of shift pulses..	21
2. Effect of linear acoustic anisotropic absorption (LAAA).....	25
2.1. Models of media exhibiting LAAA.....	25
2.2. Isotropic medium.....	26
2.3. Transverse-isotropic medium.....	28
2.4. LAAA observations on model media.....	31
2.5. LAAA observations on the model with angular unconformity with elastic symmetry elements.....	35
3. Phenomenon of shear waves depolarization (SWD) in anisotropic heterogeneous media.....	42
3.1. Theoretical aspects of the phenomenon of shear waves depolarization.....	42
3.2. Process modeling for propagation of shear waves through anisotropic plates.....	45
4. Device for acoustopolarization measurements.....	49
4.1. Peculiarities of determination of elastic wave velocities in anisotropic media.....	49
4.2. Requirements for devices and materials.....	54
4.3. Design of acoustopolariscope with rotating platform.....	57
4.4. Combined transducers for radiating and reception of compression and shear waves.....	62
5. Sequence of conducting acoustopolariscopy.....	66
5.1. General requirements for measurements.....	66
5.2. Acoustopolariscope adjustment.....	67
5.3. Conducting acoustopolariscopy.....	69
5.4. Defining the values of elastic wave velocities.....	72
6. Defining the symmetry type of a medium and elasticity constants.....	74
6.1. Ways of defining the symmetry type of a medium and elasticity constants.....	75
6.2. Analysis of location of symmetry elements in the media of orthorhombic symmetry.....	77



	Page
6.3. Calculation of elasticity constants of orthorhombic media and media of higher symmetry types.....	79
6.4. Distinguishing criteria of weakly anisotropic media.....	83
6.5. Integral assessment of elastic anisotropy of crystalline rocks.....	85
7. Acoustopolariscopy of rock forming minerals.....	88
7.1. Peculiarities of elastic properties of rock forming minerals.....	88
7.2. Minerals of highest and medium syngony.....	89
7.3. Minerals of lowest syngony.....	100
8. Acoustopolariscopy of mono-and polymineral rocks.....	108
8.1. Types of manifestation of LAAA effect in crystalline rocks.....	108
8.2. Interaction between elastic anisotropy and LAAA at the angular unconformity of their symmetry elements.....	109
8.3. Experimental results for SWD registration in rocks.....	113
8.4. Correspondence principle for metamorphosed rocks.....	117
8.5. Assessment of palaeostress parameters in metamorphosed rock masses.....	120
Conclusion.....	125
References.....	130
Attachment 1. Instructions for processing and constructing acoustopolarigrams on a personal computer (PC).....	135
Attachment 2. Crystallographic and optical characteristics of some minerals.....	142