

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ

УДК 534+53.082.4

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД  
(СКВАЖИНА ОУТОКУМПУ, ФИНЛЯНДИЯ)  
АКУСТОПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

© 2014 г. Ф. Ф. Горбачев, М. В. Ковалевский, О. М. Тришина

Геологический институт КИЦ РАН  
184209 Апатиты, ул. Ферсмана 14

E-mail: gorich@geoksc.apatity.ru

Поступила в редакцию 08.08.2013 г.

При изучении упругих свойств анизотропных твердых сред необходимо определять пространственную ориентацию элементов упругой симметрии. Особенно это актуально для случайно-неоднородных, упруго-анизотропных сред, таких как горные породы. На основе применения метода акустополярископии показана возможность определения направленности элементов симметрии образцов глубинных пород, извлеченных из скважины Оутокумпу, Финляндия. Получены показатели анизотропии образцов, вычисленные по величинам скорости продольных и поперечных волн. Выявлены дополнительные неупругие эффекты, имеющие широкое распространение в горных породах.

*Ключевые слова:* преобразователь, сдвиговые волны, амплитуда, акустополярископ, упругая анизотропия, поляризация, горная порода, образец.

DOI: 10.7868/S0320791914020063

ВВЕДЕНИЕ

Теория упругой анизотропии сред наиболее полно отражена в трудах [1–5]. Известно, что оптические постоянные упругости среды описываются тензором не выше второго порядка. При этом постоянные упругости среды низшей сингонии описываются тензором четвертого порядка [2]. Исследование таких сред связано с большими затратами труда и времени. К тому же область изучения многих объектов оптическими методами, в частности, кристаллических пород и некоторых минералов, ограничена их непрозрачностью.

Кристаллические породы, в особенности метаморфизованные, обладают сложной структурой и текстурой [6, 7]. Они неоднородны, их физические свойства зачастую изменяются на протяжении десятка сантиметров. В них проявляется трещиноватость разного ранга и масштаба, включая микротрещиноватость. Метаморфизованные породы, как правило, упруго-анизотропны. Симметрия этого типа пород, согласно экспериментальным данным, чаще всего может быть поперечно-изотропная, либо ортотропная [8–10]. Конечно, горную породу как ассоциацию минеральных зерен не следует относить к средам, имеющим строгую симметрию, которой обладают кристаллы. Скорее всего, их симметрию следует называть квазипоперечно-изотропной либо квазиортотропной.

Поскольку метаморфические породы составляют существенную часть земной коры [11], их

изучение имеет большое научное и практическое значение. Например, интерпретация результатов сейсмического зондирования в таких массивах часто является неоднозначной из-за наличия элементов симметрии и расщепления хода волновых лучей [4, 12]. Механические свойства метаморфизованных пород также обладают анизотропией, что необходимо учитывать при разработке и разрушении породных массивов в процессе подготовки и эксплуатации месторождений [13].

Ряд проблем на пути изучения упругих свойств анизотропных твердых сред, в том числе и горных пород, позволил разрешить разработанный нами акустополяризационный метод. Он представляет собой аналог оптического поляризационного метода [14]. По методу акустополярископии объект изучается с помощью линейно поляризованных сдвиговых (поперечных) ультразвуковых волн. В нем осуществляется сравнение амплитуд фаз колебаний на основе эффекта двулучепреломления, поэтому он позволяет выявить наличие упругой анизотропии и в слабоанизотропных средах. Преимуществом метода является выявление наличия и ориентации элементов упругой симметрии в твердом теле без определения, например, скоростной индикатрисы.

Результаты акустополярископии, полученные на большом числе метаморфизованных пород различного генезиса, как осадочных, так и изверженных, — песчаниках, диабазов, гранитах, гнейсах, сланцах, амфиболитах и др. — показали, что в

образцах можно выявить пространственную направленность элементов симметрии с точностью  $1^\circ - 3^\circ$  [8]. Наиболее полная сводка результатов определений свойств образцов Кольской и Уральской сверхглубоких скважин, а также Вочеламбинского полигона, опубликована в работах [8, 15]. В процессе определений выявлено широкое распространение эффекта линейной акустической анизотропии поглощения. Этот эффект возникает при наличии неизометричных зерен минералов и микротрещин, ориентированных в одном направлении. Подобная направленность структурных элементов является причиной механического ослабления прочностных свойств породы. В целом результаты показали, что без первой стадии – акустопляризационных измерений пространственного положения элементов упругой симметрии в образце – анизотропные характеристики горной породы не могут быть корректно получены.

Развитие комплекса акустоплярископии включает разработку теоретических основ метода, методических приемов, соответствующей аппаратуры и цифровой обработки результатов. Ниже последовательность этапов применения метода показана при определении упругих свойств образцов метаморфических пород исследовательской скважины Оутокумпу, Финляндия.

### ПРОХОЖДЕНИЕ СДВИГОВОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ ОБРАЗЕЦ ПОПЕРЕЧНО-ИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ

Распространение упругих колебаний в анизотропных средах в общем виде описывается уравнением Грина–Кристоффеля [16]:

$$(\Gamma_{ik} - \delta_{ik}\rho V^2)U_i = 0, \quad (1)$$

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.

По аналогии с распространением в анизотропной среде луча поляризованного света [17] рассмотрим относительно простой случай распространения сдвиговой волны в среде поперечно-изотропной симметрии. Будем считать, что в образец, изготовленный из поперечно-изотропной среды, линейно-поляризованные стационарные гармонические сдвиговые колебания передаются от излучателя в направлении, совпадающем с плоскостью симметрии [010] (рис. 1). Представим, что ориентация вектора поляризации излучателя составляет угол  $\beta$  с плоскостью [010] образца, его амплитуда равна  $A_S$ . Ориентация вектора поляризации приемника колебаний составляет угол  $\gamma$  с плоскостью [010], его чувствительность равна  $A_R$ . Амплитуда волны сдви-

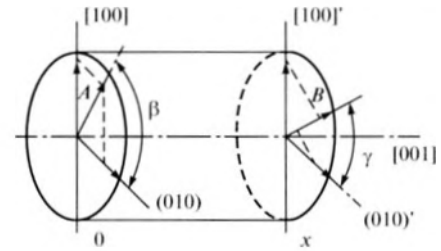


Рис. 1. Схема регистрации квазисдвиговой волны, проходящей через образец с поперечно-изотропной симметрией, при произвольно ориентированных векторах поляризации излучателя и приемника колебаний.

говых колебаний, распространяющихся вдоль плоскости симметрии среды [010], будет равна

$$A_{s1} = A_0 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi f_0 x}{V_{s1}} + \varphi_0\right), \quad (2)$$

а вдоль оси симметрии [100]

$$A_{s2} = A_0 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi f_0 x}{V_{s2}} + \varphi_0\right), \quad (3)$$

где  $\omega = 2\pi f_0$  – круговая частота колебаний,  $t$  – время,  $x$  – расстояние,  $\varphi_0$  – начальный фазовый сдвиг,  $V_{s1}$  – скорость распространения волны вдоль плоскости симметрии, а  $V_{s2}$  – вдоль оси.

Выполнив на расстоянии  $x$  сложение амплитуд (2), (3) на направление  $B$ , получим суммарную амплитуду колебаний  $A_p$ , регистрируемых приемником:

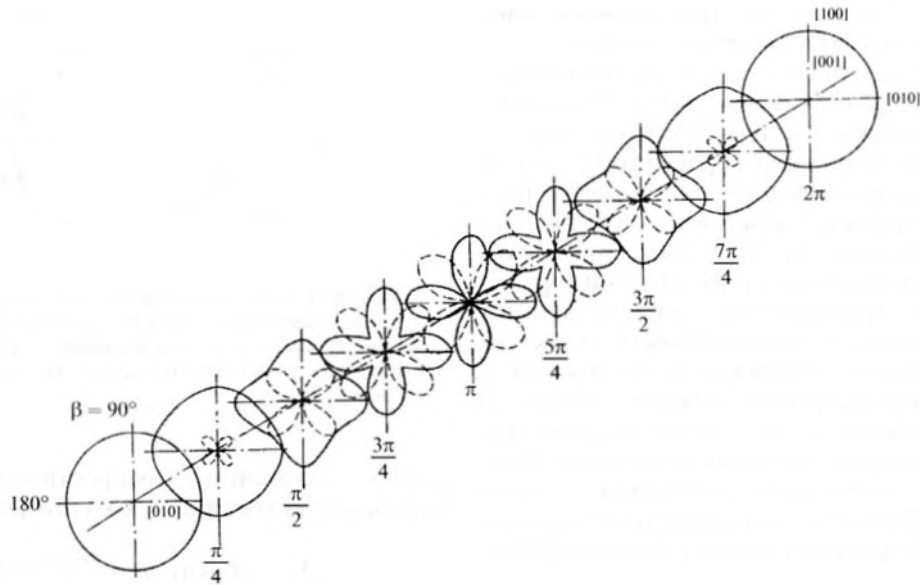
$$A_p = A_S A_R \left[ \cos\beta \cos\gamma \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_1} + \varphi_0\right) + \sin\beta \sin\gamma \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_2} + \varphi_0\right) \right], \quad (4)$$

где  $\lambda_1 = V_{s1}/f_0$ ,  $\lambda_2 = V_{s2}/f_0$ . Проследим изменение амплитуды  $A_p$  при повороте образца вокруг направления [001]. Если ориентации векторов  $A$  и  $B$  преобразователей совпадают, т.е. векторы поляризации излучателя и приемника параллельны (положение ВП), то из (4) получим [8]

$$A_{VP} = A_S A_R \left[ \cos^2\beta \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_1} + \varphi_0\right) + \sin^2\beta \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_2} + \varphi_0\right) \right]. \quad (5)$$

Если векторы поляризации излучателя и приемника направлены под прямым углом, скрещены (положение ВС), из (4) получим

$$A_{VC} = \frac{1}{2} A_S A_R \sin 2\beta \left[ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_1} + \varphi_0\right) - \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_2} + \varphi_0\right) \right]. \quad (6)$$



**Рис. 2.** 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  $\delta$ . Сплошная линия – векторы параллельны, пунктир – векторы скрещены.

Как следует из уравнений (5), (6), амплитуды  $A_{VP}$  и  $A_{VC}$  зависят от длины образца  $x$ , угла поворота  $\beta$  относительно оси  $[010]$  и текущей фазы колебаний  $\omega t$ . В общем случае при  $\beta \neq 0$  колебания  $\omega t$  получают фазовый сдвиг. Величина фазового сдвига зависит от угла  $\beta$  и величины разности фазы  $\delta = 2\pi x(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)$ .

Нетрудно показать, что при фиксированной длине образца  $x$  значения  $A_{VP}$  и  $A_{VC}$  зависят только от величин угла поворота  $\beta$  и разности фазы  $\delta$ . На рис. 2, с шагом  $\delta = \pi/4$  приведены конфигурации огibaющих амплитуд,  $A_{VPM}$  (сплошная линия) и  $A_{VCM}$  (пунктир), наблюдаемые в пределах разности фазы  $0-2\pi$ . Как видно из рис. 2, 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  $\beta$ , 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 осей  $[010]$  и  $[100]$  с ориентацией векторов поляризации излучателя и приемника. При этих ориентациях величина  $A_{VPM}$  (без учета затухания) не за-

висит от разности фазы  $\delta$ . Минимумы амплитуд  $A_{VPM}$  будут зарегистрированы при углах поворота  $\delta = \pi/4 \pm n\pi/2$ . Значение  $A_{VPM} = 0$  при тех же углах поворота  $\beta$  и разности фазы  $\delta = 2(n-1)\pi$ .

Конфигурация огibaющих  $A_{VCM}$  (рис. 2) при вращении анизотропного образца между преобразователями в положении ВС представляет, вне зависимости от разности фазы  $\delta$ , симметричную четырехлепестковую фигуру, описываемую функцией  $A_{VCM}\sin 2\beta$ . В зависимости от величины  $\delta$  изменяется лишь амплитуда максимума  $A_{VCM}$ , наблюдаемая при углах поворота  $\beta_m = \pi/4 + n\pi/2$ . Наибольшее значение  $A_{VCM}$  ( $\beta = \beta_m$ ) будет зарегистрировано при  $\delta = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$ . Вне зависимости от величины  $\delta$  минимумы  $A_{VCM}$  наблюдаются при ориентации осей  $[010]$ ,  $[100]$ , совпадающей с ориентацией вектора поляризации излучателя или приемника колебаний. Таким образом, прямые, проведенные через минимумы конфигурации  $A_{VCM}$ , укажут пространственное положение осей или плоскостей (их проекций) симметрии анизотропной среды, из которой изготовлен образец.

Анализируя рис. 2, можно заметить, что конфигурация огibaющих  $A_{VPM}$ ,  $A_{VCM}$ , названные акустополяриграммами [8], 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  $90^\circ$ . 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 направлении 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 кристаллах сравнительно мала [5]. Однако в породах со значительным поглощением ультразвука (песчаники, известняки и др.) [18] отмечено наличие заметной дисперсии скорости распространения колебаний. Одной из основных причин такой дисперсии является преобразование одного рода волны в другой (продольной волны в поперечную и наоборот) на структурных элементах, размер которых сравним или больше, чем длина зондирующей волны. Поэтому экспериментальные наблюдения акустополяриграмм  $A_{VPM}$  и  $A_{VCM}$  могут быть выполнены корректно, если размер структурных элементов (минеральных зерен породы) в пять и более раз меньше длины зондируемой волны.

### ЭФФЕКТ ЛИНЕЙНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ПОГЛОЩЕНИЯ

Эффект линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП) сдвиговых волн наиболее наглядно проявляется на примере пассивного анализатора, предложенного Т.М. Проктором [19]. Это устройство представляет собой пачку стеклянных пластин, склеенных, например, воском, эпоксидной смолой или с воздушной прослойкой между ними. Перпендикулярно торцам пачки стеклянных пластин пришлифованы параллельные друг другу рабочие плоскости. Пучки лучей сдвиговых колебаний направляются в устройство через эти плоскости. 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. Как отмечает Т.М. Проктор, изменение амплитуды проходящих через анализатор сдвиговых колебаний в зависимости от угла поворота вектора поляризации относительно ориентации пластин близко к косинусоидальной функции  $A = A_0 \cos j$ .

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 векторе поляризации, направленном перпендикулярно направлению наибольшего пропускания (НП). Исходя из косинусоидальности функции ЛААП [19], для амплитуды  $A_{VP}$  принимаемых колебаний, измеренной при параллельных векторах поляризации преобразователей (положение ВП), получим

$$A_{VP} = A_S A_R A_{RE} \cos j \sin\left(\omega t + \frac{2\pi x}{\lambda} + \varphi_0\right), \quad (7)$$

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;  $\lambda$  — длина волны;  $x$  — длина образца. 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  $A_{RE} = A_{RR}$ . Тогда в направлении “наибольшего пропускания” коэффициент  $A_{RE} = A_{RN} + A_{RR}$ . В последнем выражении  $A_{RN}$  — дополнительный к  $A_{RR}$  коэффициент пропускания в направлении НП.

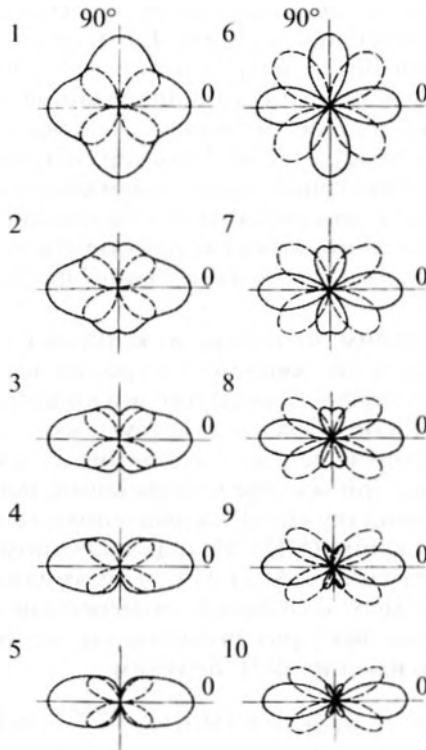
Уравнение (7) для случая неидеального проявления ЛААП получит вид

$$A_{VP} = A_S A_R (A_{RN} \cos j + A_{RR}) \sin\left(\omega t + \frac{2\pi x}{\lambda} + \varphi_0\right). \quad (8)$$

Степень проявления ЛААП в образце можно выразить следующим показателем [8]:

$$D = \frac{A_{RE} - A_{RR}}{A_{RE} + A_{RR}}, \quad (9)$$

где величина  $A_{RE}$  определяется при  $j = 0$ , а  $A_{RR}$  — при  $j = 90^\circ$ . Согласно (9) образец, идеально проявляющий ЛААП, имеет степень, равную 1, при отсутствии эффекта  $D = 0$ . Амплитуда сдвиговых колебаний, прошедших образец в направлении плоскости симметрии поперечно-изотропного образца, положение ВП, описывается уравнением (5), а в положении ВС —



**Рис. 3.** 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.

уравнением (6). При совместном действии эффектов ЛААП и упругой анизотропии, учитывая множитель выражения (8), уравнения (5) и (6) получают вид

$$A_{VP} = A_S A_R (A_{RN} \cos j + A_{RR}) \times \left[ \cos^2 \beta \sin \left( \omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_1} + \varphi_0 \right) + \sin^2 \beta \sin \left( \omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_2} + \varphi_0 \right) \right], \quad (10)$$

$$A_{VC} = \frac{1}{2} A_S A_R (A_{RN} \cos j + A_{RR}) \times \left[ \sin 2\beta \left[ \sin \left( \omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_1} + \varphi_0 \right) - \sin \left( \omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_2} + \varphi_0 \right) \right] \right]. \quad (11)$$

Уравнения (10) и (11) описывают изменения гармонических амплитуд сдвиговых колебаний, прошедших образец, изготовленный из среды, проявляющей поперечно-изотропную симметрию упругих свойств и эффект линейной анизотропии

поглощения, когда в первом случае векторы поляризации излучателя и приемника параллельны, а во втором скрещены под углом  $90^\circ$ .

На рис. 3.1–3.5 приведены круговые диаграммы изменения огибающих гармонических амплитуд  $A_{VP}$  и  $A_{VC}$  в зависимости от угла поворота относительно плоскости упругой симметрии среды при сдвиге фазы на приемном торце образца, равном  $\pi/2$  ( $\delta = 90^\circ$ ) [8]. На рис. 3.1 круговые диаграммы приведены для образца, который не проявляет ЛААП ( $D = 0$ ), на рис. 3.2 – для  $D = 0.25$ , на рис. 3.3, 3.4, и 3.5 – для  $D = 0.5$ ,  $D = 0.75$  и  $D = 1.0$ , соответственно. Круговые диаграммы для случая  $\delta = \pi$ ,  $j = \delta$ ,  $D = 0$ , а также для  $\delta = \pi$ ,  $j = \delta$ ,  $D = 0.25$ ,  $D = 0.25$ ,  $D = 0.75$ ,  $D = 1$ , представлены на рис. 3.6–3.10.

### ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АКУСТОПОЛЯРИСКОПИИ

Для акустополаризационных определений и измерения скорости необходимы преобразователи, излучающие интенсивные линейно-поляризованные чисто сдвиговые колебания. Если измерения производятся в сильно поглощающих средах, рабочая частота преобразователей должна быть возможно более низкой, но при этом она должна быть достаточно высокой, чтобы длина излучаемой волны была по крайней мере в 4–5 раз больше размеров структурных элементов среды. Нами используются преобразователи, в которых продольные колебания, излучаемые пьезопластиной, преобразуются в сдвиговые на плоской границе раздела двух акустически различающихся по свойствам сред [20]. Основная частота колебаний преобразователей определяется собственной частотой пьезопластины и может составлять  $f_0 = 0.4$ – $10.0$  МГц.

Непосредственно для проведения акустополарископии нами разработано несколько конструкций акустополарископов [15]. Наиболее часто применяется акустополарископ с поворотной платформой (рис. 4) [21]. 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. Поворотная платформа установлена на дополнительном кронштейне 8. На ней имеется шкала 9, предназначенная для отсчета угла поворота образца относительно ориентации векторов поляризации (ОВП) преобразователей. Отсчет этого угла производится относительно метки 10 на дополнительном кронштейне. Электрокабели пре-

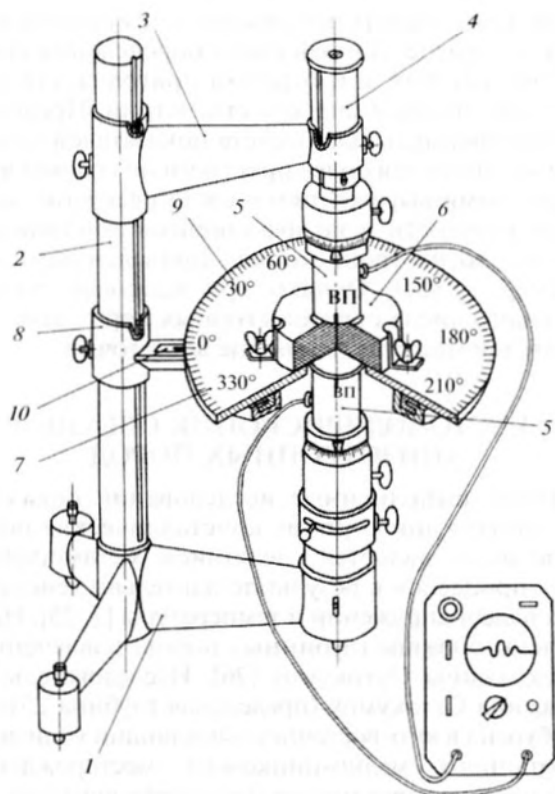


Рис. 4. Конструкция акустополарископа с поворотной платформой: 1 – основание, 2 – стойка, 3 – кронштейн, 4 – подвижный шток, 5 – преобразователи, 6 – образец, 7 – поворотная платформа, 8 – дополнительный кронштейн, 9 – шкала углов, 10 – указатель.

образователей 5 подключены к ультразвуковому прибору, предназначенному для излучения импульсов и визуализации проходящих через образец ультразвуковых колебаний. Применяемые варианты акустополарископов позволяют выполнять акустополаризационные измерения в широком диапазоне ультразвуковых частот и раз-

меров образцов (10–100 мм) [15]. Разработанный программно-аппаратный комплекс ACOUSTPOL включает акустополарископ, электрический привод платформы, дефектоскоп, контроллер, ноутбук и соответствующее программное обеспечение (рис. 5) [22]. Комплекс ACOUSTPOL позволяет проводить определения в автоматическом режиме с передачей данных в компьютер, их обработкой и выводом на принтер.

### ПРОВЕДЕНИЕ АКУСТОПОЛЯРИСКОПИИ

Целью исследования упругих свойств анизотропных сред методом акустополарископии является получение акустополаризационных диаграмм, построение пространственного положения элементов упругой симметрии, выявление наличия эффекта ЛААП и других эффектов, определение значений 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 материала образца. 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.

Перед началом измерений подвижную платформу акустополарископа устанавливают на нулевую отметку шкалы углов, напротив метки на дополнительном кронштейне (рис. 4). Отметки векторов поляризации преобразователей совмещают по одной линии. На рабочие поверхности преобразователей наносят контактную среду, проводящую сдвиговые колебания и позволяющую вращать образец относительно преобразователей. Устанавливают и закрепляют образец на поворотной платформе.

На первом этапе измерения проводятся при параллельных векторах поляризации излучателя

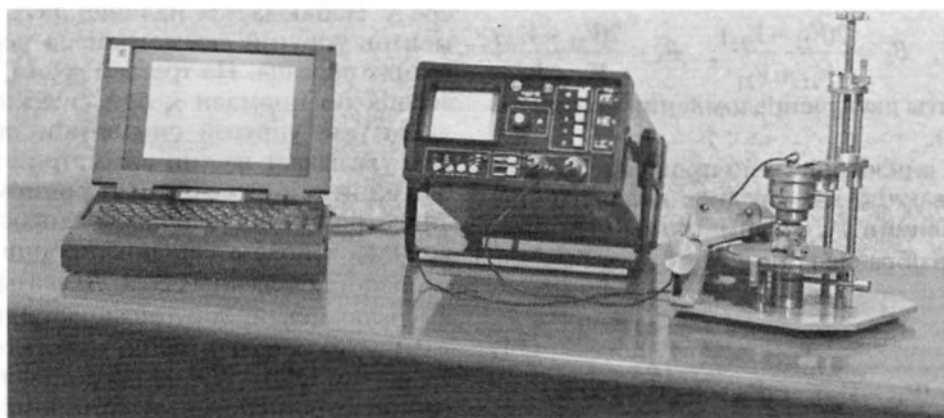


Рис. 5. Внешний вид программно-аппаратного комплекса ACOUSTPOL.



и приемника колебаний (положение ВП). На втором этапе векторы поляризации преобразователей устанавливаются под прямым углом (положение ВС). Результатом измерений являются акустополяриграммы ВП и ВС – круговые диаграммы изменения амплитуды огибающей импульса в пределах полного угла поворота поворотной платформы. По акустополяриграммам ВП определяется наличие и степень проявления эффекта ЛААП. Акустополяриграммы, полученные в положении ВС, позволяют определить число и направленность проекций элементов упругой симметрии анизотропного образца, наличие неупругих эффектов.

На последующих этапах, в соответствии с выявленными пространственными направлениями элементов упругой симметрии, измеряются скорости распространения двух квазипоперечных (сдвиговых) и одной продольной волн на каждой грани образца. Результаты определений записываются в виде квазиматрицы скоростей [15]:

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

где  $V_{11}$  – скорость распространения продольных колебаний, измеренная в направлении 1–1' кубического образца;  $V_{22}$  – то же в направлении 2–2';  $V_{33}$  – то же в направлении 3–3';  $V_{12}$  – скорость распространения сдвиговых колебаний, измеренная в направлении 1–1' при ориентировке вектора поляризации излучателя в направлении 2–2';  $V_{13}$  – то же в направлении 1–1' при ориентировке вектора поляризации в направлении 3–3'. Аналогично обозначены  $V_{21}$ ,  $V_{23}$ ,  $V_{31}$ ,  $V_{32}$ .

Величины показателя упругой анизотропии (коэффициента двулучепреломления) по поперечным волнам  $B_S$  определяются с использованием данных квазиматрицы (1) по следующим формулам [23]:

$$B_S = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2} \times 100\%, \quad (13)$$

где

$$B_1 = \frac{2(V_{12} - V_{13})}{V_{12} + V_{13}}, \quad B_2 = \frac{2(V_{21} - V_{23})}{V_{21} + V_{23}}, \quad B_3 = \frac{2(V_{31} - V_{32})}{V_{31} + V_{32}}$$

– коэффициенты двулучепреломления по граням 1, 2 и 3 образца.

Показатели анизотропии по продольным волнам рассчитываются как среднее квадратичное отклонение величин  $V_{ii}$  квазиматрицы (12) продольных волн в образце [15]:

$$A_p = \frac{1}{V_{cp}} \times \quad (14)$$

$$\times \sqrt{(V_{11} - V_{cp})^2 + (V_{22} - V_{cp})^2 + (V_{33} - V_{cp})^2} \times 100\%,$$

где

$$V_{cp} = (V_{11} + V_{22} + V_{33})/3 \quad (15)$$

– средняя скорость распространения продольных волн в образце. Данная схема определения показателей упругой анизотропии пригодна для сред не ниже орторомбической симметрии. Представленные формулы для расчета показателей анизотропии являются более простыми по сравнению с известными выражениями для определения констант упругости и коэффициентов анизотропии поперечно-изотропного тела, приведенными, например, в [24]. Однако при массовой оценке большого числа образцов горных пород этих показателей может быть вполне достаточно.

### АКУСТОПОЛЯРИСКОПИЯ ОБРАЗЦОВ АНИЗОТРОПНЫХ ПОРОД

Ранее выполненные исследования показали, что упругая анизотропия кристаллических пород чаще всего является следствием метаморфических процессов в результате длительно действующих палеонапряжений и температуры [7, 25]. Нами изучены образцы глубинных пород, извлеченных из скважины Оутокумпу [26]. Исследовательская скважина Оутокумпу (предельная глубина 2516 м) пробурена в юго-восточной Финляндии вблизи отработанного медно-цинкового месторождения. Она прошла через массив метаморфизованных пород протерозойского и архейского возраста. Основная часть пород представлена мелкозернистыми биотитовыми и биотит–мусковитовыми сланцами, диопсид–тремолитами, гранитами и пегматитами.

Образцы для акустополаризационных измерений из керна скважины изготавливались в форме куба размером 25–35 мм. В таблице приведены характеристики наиболее представительных пород, а на рис. 6 – их акустополяриграммы. Грань 3 ориентирована по нормали к оси скважины. В таблице также даны характеристика пород, плотность, квазиматрицы скорости, показатели упругой и неупругой анизотропии.

Согласно данным рис. 6 и таблицы, образец ODB-153\_20 гранат–биотитового сланца с графитом представляет собой упруго-анизотропную среду. Наблюдается наличие двух проекций элементов упругой симметрии на первой и второй гранях образца. На третьей грани, которая образована по нормали к оси скважины, проекции элементов упругой симметрии не выявляются. Это указывает на тип симметрии этого образца, близкий к поперечно-изотропному. Показатель анизотропии по величинам скорости продольных волн  $A_p$  и показатель анизотропии по величинам скорости поперечных волн  $B_S$  указывают на весьма высокую степень упругой анизотропии породы [8].

Другой образец гранат–биотитового сланца с графитом ODB-599\_00 представляет собой упруго-анизотропную среду орторомбического типа симметрии, на что указывает наличие двух проекций элементов упругой симметрии на всех трех

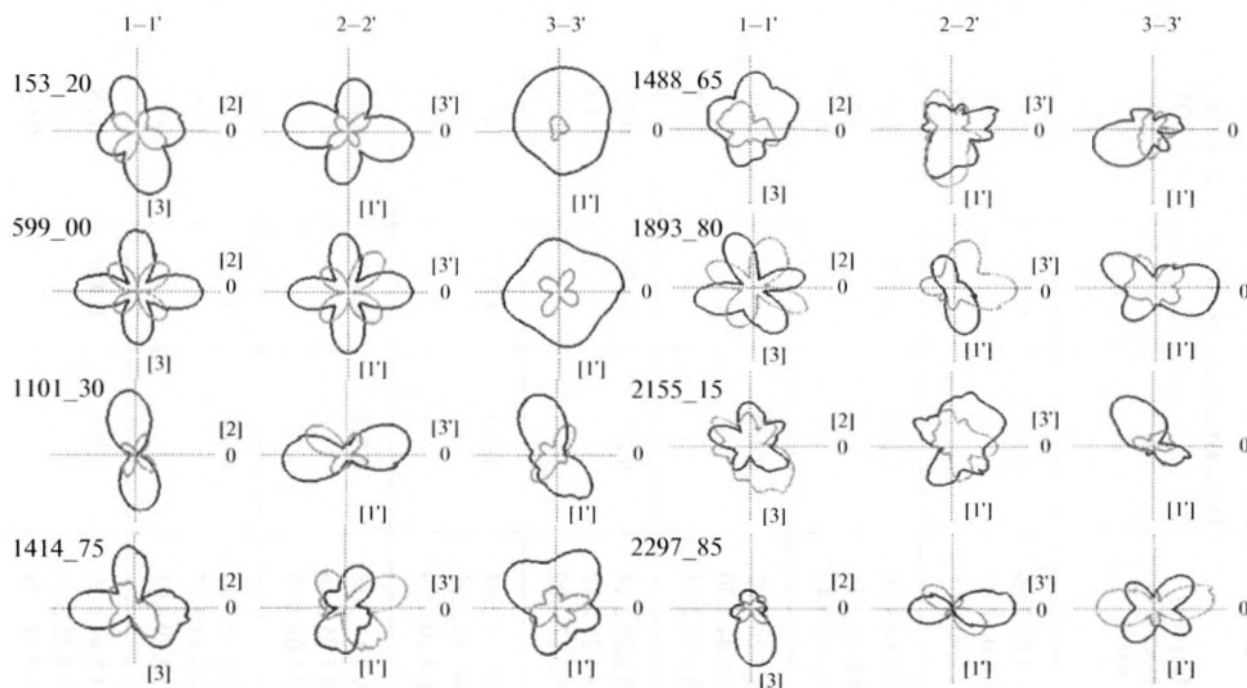


Рис. 6. Акустополариграммы образцов глубинных пород, извлеченных из скважины Оутокумпу. Векторы параллельны (ВП) – темная, скрещены (ВС) – светлая линия.

гранях образца. Соотношения величин скоростей продольных и поперечных колебаний в матрице скоростей (таблица) подтверждают данный вывод. Показатели  $A_p$  и  $B_S$  указывают на среднюю степень упругой анизотропии породы. Диаграммы образцов ODB-153\_20 и ODB-599\_00 близки к теоретическим (рис. 2).

Образец биотит–мусковитового сланца с прожилками гипс–карбонатного состава ODB-1101\_30 является упруго-анизотропной средой, близкой к орторомбическому типу симметрии. Однако главным отличием этого образца от предыдущих является существенное проявление эффекта ЛААП. Показатель эффекта ЛААП в этом образце достигает величины на первой грани  $D_1 = 0.91$ , на второй –  $D_2 = 0.83$  (см. таблицу). По-видимому, наличие большого количества ориентированных пластинок слюды и прожилки гипс–карбонатного состава являются причиной наличия эффекта ЛААП в данном образце. Ранее при изучении сходных пород, извлеченных из Кольской сверхглубокой скважины (предельная глубина 12261 м), эффект ЛААП зарегистрирован в более чем половине образцов [8]. Показатели  $A_p$  и  $B_S$  указывают на высокую степень упругой анизотропии породы, что также можно объяснить высоким содержанием слюд в этом образце.

Акустополариграммы серпентинита, образец ODB-1414\_75, (рис. 6, таблица) указывают на проявление неоднородностей и упругой анизотропии в его структуре. Этот образец также пред-

ставляет собой упруго-анизотропную среду с типом симметрии, близким к орторомбическому. При этом величины показателей  $A_p$  и  $B_S$  сравнительно невелики. Данную породу можно считать слабо анизотропной, неоднородной, с проявлением эффекта ЛААП на грани 2.

Акустополариграммы всех трех пар граней образца ODB-1488\_65 диопсид–тремолитовой породы (рис. 6) отражают неоднородность строения, хаотичную пространственную направленность элементов упругой симметрии в минеральных зернах. На первой и, в особенности, на второй гранях образца проявляется эффект деполаризации сдвиговых волн (ДСВ) [27]. Эффект ДСВ выражается в аномально больших, округленных очертаниях, без резко выраженных минимумов, акустополариграмм, полученных при скрещенных векторах поляризации. Аналогичный эффект деполаризации линейно поляризованных световых волн при прохождении через случайно неоднородные среды или среды, составленные из анизотропных зерен (слоев) с разнонаправленными элементами симметрии, ранее был зарегистрирован в оптике [17]. В этом случае он обусловлен разнонаправленностью элементов симметрии в соседних зернах породы.

Акустополариграммы образца ODB-1893\_80 грубозернистого гранита показывают, что его структура более упорядочена, чем структура предыдущего образца. Порода сложена крупными (2–5 мм) слабо деформированными кристаллами плагиоклаза, микроклина, кварца, редкими



Номер образца	Наименование породы	Глубина отбора $H$ , м	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Матрица скорости $V_{ij}$ , км/с	Показатель анизотропии		Показатель ЛААП $D_1, D_2, D_3$
					$A_p$	$B_s$	
ODB-153_20	Гранат–биотитовый сланец с графитом	153.20	2.62	5.45 3.62 2.96 3.61 6.00 2.97 2.88 2.96 4.61	0.185	0.281	0.19 0.10 0.15
ODB-599_00	Гранат–биотитовый сланец с графитом	599.00	2.72	5.72 3.60 3.39 3.58 6.16 3.44 3.38 3.42 5.47	0.085	0.074	0.05 0.01 0.05
ODB-1101_30	Биотит–мусковитовый сланец с прожилками гипс–карбонатного состава	1101.30	2.73	4.45 3.26 3.22 3.22 5.44 2.50 1.95 2.43 2.85	0.435	0.332	0.91 0.83 0.57
ODB-1414_75	Серпентинит	1414.75	2.48	4.20 2.28 2.18 2.26 4.25 2.12 2.15 2.17 4.09	0.027	0.079	0.24 0.64 0.03
ODB-1488_65	Диопсид–тремолитовая порода	1488.65	3.22	4.85 3.19 2.94 3.14 5.38 2.95 3.06 3.10 4.79	0.091	0.103	0.11 0.21 0.23
ODB-1893_80	Грубозернистый гранит	1893.80	2.62	5.09 3.11 3.18 2.99 5.05 3.16 3.07 3.08 4.65	0.070	0.060	0.02 0.71 0.25
ODB-2155_15	Мусковитовый пегматит с гранатом	2155.15	2.58	4.62 2.69 2.87 2.91 4.53 2.67 2.92 2.89 4.95	0.066	0.109	0.11 0.09 0.67
ODB-2297_85	Биотитовый сланец	2297.85	2.66	4.65 2.99 2.20 2.97 4.72 2.19 2.31 2.32 3.34	0.259	0.429	0.38 1.0 0.07

пластинками мусковита [26]. Элементы упругой симметрии четко выделяются на первой грани. На второй и третьей гранях их также можно выделить. Акустополариграммы второй и третьей грани показывают наличие эффекта ЛААП, что можно объяснить присутствием плагиоклаза и слюды. В целом, породу этого образца можно охарактеризовать как неоднородную и слабоанизотропную, с проявлением ЛААП.

Образец ODB-2155\_15 мусковитового пегматита с гранатом обнаруживает, помимо неоднородностей в его строении, еще и проявление эффекта ДСВ [27]. На это указывают аномально большие амплитуды проходящих колебаний, зарегистрированные при скрещенных векторах поляризации на диаграммах 1 и 2 граней образца (рис. 6). Из-за проявления эффекта ДСВ и наличия неоднородностей выявить ориентировку элементов упругой симметрии на гранях 1, 2 не представилось возможным. На третьей паре граней этого образца регистрируется проявление эффекта ЛААП. Разнонаправленность элементов симметрии совокупности минеральных зерен в породе обусловили низкие значения показателей  $A_p$  и  $B_S$ .

Характерные особенности акустополариграмм образца ODB-2297\_85 биотитового сланца совпадают с такими же диаграммами сланцев верхней части разреза, до глубин ~1300 м. Этот образец характеризуется отчетливо выраженным ориентированным расположением пластинок биотита [26]. Образец обладает симметрией, близкой к ромбической, так как на каждой грани хорошо выделяются проекции ее элементов. Проявление ЛААП на первой ( $D_1 = 0.38$ ) и второй ( $D_2 \approx 1.0$ ) гранях обусловлено, с одной стороны, высоким содержанием биотита и плагиоклаза, а с другой — ориентированным расположением зерен этих минералов. Порода показывает, судя по величинам  $A_p$  и  $B_S$ , высокий уровень анизотропии.

### ВЫВОДЫ

Теоретические основы акустополаризационных наблюдений разработаны пока лишь для простой модели поперечно-изотропной среды. Однако предложенный нами теоретический подход вполне удовлетворительно, как показала практика измерений [8, 15], отражает процессы распространения сдвиговых колебаний в более сложных средах, вплоть до сред ромбической симметрии. Метод акустополарископии позволяет определять пространственное положение элементов, вид и степень упругой симметрии анизотропной горной породы, что важно при разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых. Выполненные определения свойств образцов глубокой скважины Оутокумпу показали, что по акустополариграммам можно качественно определить наличие упругой анизотропии, степень

структурной неоднородности, проявление эффектов ЛААП, ДСВ и др. Эффект ЛААП, как правило, связан с ориентированным расположением неизометричных зерен минералов, кристаллоакустических элементов симметрии в них, микротрещиноватостью. Эффект ДСВ позволяет выявить структуры с разнонаправленными элементами симметрии в минеральных зернах, их веерное рассеяние. Акустополариграммы ВП позволяют произвести качественную оценку степени неоднородности образца.

Последующие определения величин скорости распространения упругих колебаний в направлениях, совпадающих с элементами упругой симметрии и некоторых дополнительных к ним, расчеты показателей анизотропии, позволяют получить сравнительно полную характеристику такой сложной, поликомпонентной, неоднородной упругоанизотропной среды, как горная порода [6, 28]. Представленные методические приемы и аппаратура, по нашему мнению, могут найти применение при анализе других твердых сред, например, материалов, применяемых в промышленности.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований (гранты №№ 94-05-16034-а, 97-05-64167-а, 00-05-64057-а, 03-05-64159-а, 07-05-00100-а, 10-05-00082-а, 13-05-00125-а), при поддержке которого получена большая часть приведенных в статье результатов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лехницкий С.Г.* Теория упругости анизотропного тела. М.: Гостехиздат, 1957. 343 с.
2. *Най Дж.* Физические свойства кристаллов. М.: ИЛ, 1960. 385 с.
3. *Федоров Ф.И.* Теория упругих волн в кристаллах. М.: Наука, 1965. 384 с.
4. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
5. *Лямов В.Е.* Поляризационные эффекты и анизотропия взаимодействия акустических волн в кристаллах. М.: МГУ, 1983. 224 с.
6. *Беликов Б.П., Александров К.С., Рыжова Т.В.* Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. М.: Наука, 1970. 276 с.
7. *Петрофизика.* Справочник. Т. 3. М.: Недра, 1992. 289 с.
8. *Горбачевич Ф.Ф.* Акустополарископия горных пород. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. 204 с.
9. *Mah M., Schmitt D.* Experimental determination of the elastic coefficients of an orthorhombic material // *Geophys.* 2001. V. 66. Special section. P. 1217–1225.
10. *Wang Z.* Seismic anisotropy in sedimentary rocks, part 1: A single plug laboratory method // *Geophys.* 2002. V. 67. № 5. P. 1415–1422.
11. *Аллисон А., Палмер Д.* Геология. М.: Мир, 1984. 568 с.
12. *Петрашень Г.И.* Распространение волн в анизотропных упругих средах. Л.: Наука, 1980. 280 с.

13. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. М.: Недра, 1975. 279 с.
14. Волкова Е.А. Поляризационные измерения. М.: Изд-во Стандартов, 1974. 156 с.
15. Gorbatsevich F.F. Acoustopolariscopy of Minerals and Rocks. VDM Verlag. Saarbrucken, 2009. 144 p.
16. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. М.: Наука, 1982. 424 с.
17. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
18. Lucet N., Zinsner B. Effects of heterogeneities and anisotropy on sonic and ultrasonic attenuation in rocks // Geophys. 1992. V. 57. № 8. P. 1018–1026.
19. Proctor T.M. A passive analyzer for ultrasonic shear waves // J. Acoust. Soc. Am. 1971. V. 50. № 5. P. 1379–1381.
20. Искатель поперечных ультразвуковых колебаний / Горбацевич Ф.Ф., Бакулин В.Н. Авторс. свид. 785737, СССР, МКИ GOI N 29/04. Бюлл. изобр. 1980.
21. Акустополарископ для измерения упругости образцов твердых сред / Горбацевич Ф.Ф. Авторс. свид. 1281993, СССР, МКИ GOI N 29/04. Бюлл. изобр. 1987.
22. Ковалевский М.В. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс Acoustpol. Учебн. пособие. Апатиты: Изд-во ООО "К & М", 2009. 49 с.
23. Clark A.V., Mignogna P.B., Sanford R.J. Acoustoelastic measurements of stress and stress intensity factors around crack tips // Ultrasonics. 1983. № 3. P. 57–64.
24. Thomsen L. Weak elastic anisotropy // Geophys. 1986. V. 51. № 10. P. 1954–1966.
25. Лебедев А.В., Бредихин В.В., Бретштейн Ю.С. О корреляции упругой анизотропии и анизотропии магнитной восприимчивости осадочных и метаморфических горных пород // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 3. С. 386–395.
26. Outokumpu Deep Drilling Project 2003–2010. Ed. I.T. Kukkonen. Geological Survey of Finland. Special Paper. № 51. Espoo. 2011. 252 p.
27. Горбацевич Ф.Ф. Явление деполяризации сдвиговых волн в анизотропных гетерогенных средах // Физика Земли. 1998. № 6. С. 83–90.
28. Чеботарева И.Я. Методы пассивного исследования геологической среды с использованием сейсмического шума // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 6. С. 844–853.