

УПРУГАЯ СИММЕТРИЯ И ПАРАМЕТРЫ АНИЗОТРОПИИ ОБРАЗЦОВ АРХЕЙСКИХ ГНЕЙСОВ И АМФИБОЛИТОВ КОЛЬСКОЙ СВЕРХГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЫ

Г. Т. Продайвода, К. С. Александров*

*Киевский университет, 252022, Киев, ул. Васильковская, 90, Украина
* Институт физики СО РАН, 660036, Красноярск, Академгородок, Россия*

Инвариантно-поляризационным ультразвуковым методом исследованы скорости объемных упругих волн в гнейсах и амфиболитах второй толщи архейского комплекса Кольской сверхглубокой скважины (7622—9456 м), а также вычислены детерминированные составляющие акустического тензора и тензора упругих постоянных и их симметрия. Симметрия исследованных текстур оказалась ромбической и триклинной. Построены стереопроекции кристаллографической ориентации минералов и нормалей к микротрещинам по данным инверсии азимутальной зависимости упругих постоянных.

Кольская сверхглубокая скважина, гнейсы, амфиболиты, упругая симметрия, анизотропия, объемные упругие волны, ориентация микротрещин.

G. T. Prodaivoda and K. S. Aleksandrov

ELASTIC SYMMETRY AND ANISOTROPIC PARAMETERS OF SPECIMENS OF ARCHEAN GNEISSES AND KOLA SUPERDEEP-BOREHOLE AMPHIBOLITES

Using an invariant-polarization ultrasound method, we have studied the velocities of elastic waves in the gneisses and amphibolites of the second rock mass of the Archean complex of the Kola superdeep borehole (7622—9456 m) and calculated the determinate components of acoustic tensor and elastic-constant tensor and their symmetry. The symmetry of the studied structures is shown to be rhombic and triclinic. The stereoprojections of mineral's crystallographic orientation and normals to microfractures are built by the data on the inversion of the azimuthal dependence of elastic constants.

Kola superdeep borehole, gneisses, amphibolites, elastic symmetry, anisotropy, bulk elastic waves, microfracture orientation

Сейсмическая анизотропия — источник ценной информации о составе, структуре и напряженном состоянии земных недр, представляющий интерес для интерпретации данных многоволновой сейсморазведки [1]. Исследования образцов керна Кольской сверхглубокой скважины ультразвуковыми методами подтверждают, что для них характерна анизотропия скоростей упругих волн [2, 3]. Извлекаемый с больших глубин керн, в результате декомпрессии и релаксации напряжений на поверхности, испытывает техногенное разуплотнение, которое сопровождается формированием вторичных микротрещин. Первичные микротрещины связаны с процессами метаморфизма и напряженным состоянием пород. Формирование закрытых микротрещин гидроразрыва связано с высоким давлением флюида, высвобождающегося при прогрессивном метаморфизме [4]. Возникающая при гидроразрывах пустотность развивается сначала в виде межкристалльных и внутрикристалльных микротрещин, заполненных флюидом, и лишь в дальнейшем, при дислокациях, вскрывается с образованием открытой пористости и макротрещиноватости. Сейсмические исследования расщепления поперечных волн, выполненные С. Крэмпингом [5], показали, что практически повсюду наблюдается расщепление поперечных волн и их поляризация перпендикулярно к направлению сжимающих напряжений. Анизотропия, вызванная ориентированными сухими и насыщенными микротрещинами, которые индуцированы напряженным состоянием, называется экстенсивной анизотропией дилатансии (ЕДА).

Традиционные ультразвуковые исследования скоростей волн продольной и поперечной поляризации в трех ортогональных направлениях не позволяют определять упругую симметрию текстур горных пород и не учитывают влияние структурной неоднородности, прежде всего ориентированных первичных и вторичных микротрещин.

Настоящая статья посвящается экспериментальным исследованиям упругих постоянных гнейсов и амфиболитов второго слоя архейского комплекса Кольской сверхглубокой скважины. Вычисление детерминированной составляющей тензора упругих постоянных осуществлялось в триклинном приближении с применением операции сглаживания флуктуационной составляющей фазовых ско-

Таблица 1. Геолого-петрографическая характеристика образцов керна Кольской сверхглубокой скважины (СГС-3)

| Номер образца | Интервал глубин отбора образца, м | Петрографический тип породы | Характеристика текстуры | Возраст |
|---------------|---|--|--|---------------------------------------|
| 25549 | 7822—7894 | Амфиболит среднезернистый | Полосчатая | Архейский (толща II) |
| 27313 | 8017—8022 | Гнейс биотит-амфибол-плагиоклазовый | » | » |
| 27743 | 8022—8234 | Гнейс меланократовый, мусковит-биотит-плагиоклазовый (биотит 25—30 %; мусковит 20—25 %; плагиоклаз 35—40 %) | » | » |
| 31240 | 8728—8760 | Амфиболит мелкозернистый (роговая обманка 70—80 %; плагиоклаз 10—20 %; биотит 10—15 %) | Полосчатая рассланцованная | » |
| ЛА-47 | Отобран из обнажения о. Пеллотсари Ладожского озера (синклиналиная структура, складка ламинарного типа) | Амфиболит (роговая обманка 85 %, плагиоклаз, биотит, сфен) | Линейная (ориентировка удлиненных зерен роговой обманки) | Нижнепротерозойский (ладожская серия) |
| ЛА-45 | » | Микрогнейс (кварц — 32 %, плагиоклаз — 40 %, биотит — 6 %, мусковит — 4 %, калиевый полевой шпат — 15 %, гранат — 3 %) | Микрополосчатая | » |

ростей, обусловленной несовершенством текстуры пород. Упругие постоянные представлялись в стандартной акустической системе координат, базис которой совпадает с собственными векторами детерминированной составляющей акустического тензора. Функция распределения ориентаций (ФРО) микротрещин вычисляется путем инверсии азимутальной зависимости упругих постоянных горных пород.

ГЕОЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБРАЗЦОВ

Кольская сверхглубокая скважина заложена в северо-восточной части Балтийского щита в области сочленения рудоносных докембрийских структур, типичных для фундаментов древних платформ. Она полностью пересекла образования протерозойского комплекса и значительную часть архейского [2, 4]. Были исследованы образцы второй толщи архейского комплекса (7622—9456 м), которые представлены гнейсами и амфиболитами. По минеральным ассоциациям их относят к амфиболитовой фации метаморфизма [2, 4]. Краткая геолого-петрографическая характеристика образцов представлена в табл. 1. По макроскопическим признакам преобладают плоскостные текстуры пород, которые проявляются в виде полосчатости и сланцеватости. Макроскопически открытых трещин и механических повреждений не наблюдалось. Для сопоставления результатов были изучены образцы, отобранные на поверхности. Образцы амфиболита (ЛА-47) и микрогнейса (ЛА-45) отобраны из синклиналиной структуры, расположенной в западной части о. Пеллотсари на Ладожском озере, представляющей собой складку ламинарного типа. По минеральным ассоциациям породы этой структуры принадлежат к силлиманит-альмандин-мусковитовой субфации амфиболитовой фации метаморфизма [6].

ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Из штуфа керна на камнерезном станке (пилой) были изготовлены образцы, имеющие форму куборомбододекаэдра (куб со срезанными ребрами), грани которых обозначаются кристаллографическими индексами [100], [101] и т. д. в рабочей системе координат. Вдоль каждого из девяти направлений куборомбододекаэдра были измерены фазовые скорости трех упругих волн с ортогональными векторами поляризации (квазипродольной, „медленной“ и „быстрой“ квазипоперечных волн). Для измерений использовался ультразвуковой импульсно-фазовый метод, который описан в статье [7]. В качестве излучателей и приемников продольных мод использовались пьезопреобразователи из ниобата лития Z-среза, а для возбуждения и регистрации сдвиговых мод — X-среза. Частота колебаний 1 МГц. При регистрации поперечных мод учитывалось явление акустического двулучепреломления и поляризационные эффекты. При излучении линейно-поляризованной волны в произвольном направлении анизотропной среды она расщепляется на две волны, которые на некотором расстоянии при возбуждении короткими импульсами, благодаря разности скоростей, и их можно наблюдать отдельно. В случае возбуждения длинными импульсами эти волны интерферируют между собой. Для отдельной регистрации „быстрой“ и „медленной“ поперечных мод держатель образца был снабжен теодолитным устройством, обеспечивающим соосное вращение и надежную регистрацию угла поворота образца по отношению к фиксированным, взаимно параллель-

Таблица 2. Экспериментальные (а) и уравновешенные (б) значения фазовых скоростей объемных упругих волн в образцах пород разреза Кольской СГС-3

| Кристаллографические символы направлений куборомбододекаэдра | Значения фазовых скоростей квазипродольной, „медленной“ и „быстрой“ квазипоперечных волн, $10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ | | | | | | | | | | | |
|--|--|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| | Номер образца | | | | | | | | | | | |
| | 25549 | | 27313 | | 27743 | | 31240 | | ЛА-47 | | ЛА-45 | |
| | а | б | а | б | а | б | а | б | а | б | а | б |
| 100 | 5,81 | 5,78 | 5,04 | 5,04 | 5,12 | 5,10 | 5,12 | 5,08 | 6,17 | 6,18 | 5,45 | 5,44 |
| | 2,77 | 2,76 | 2,71 | 2,71 | 2,91 | 2,90 | 2,90 | 2,88 | 3,48 | 3,48 | 3,27 | 3,27 |
| | 3,13 | 3,71 | 2,79 | 2,79 | 3,02 | 3,01 | 3,19 | 3,17 | 3,69 | 3,69 | 3,42 | 3,42 |
| 010 | 5,57 | 5,54 | 5,38 | 5,38 | 5,22 | 5,20 | 4,60 | 4,56 | 6,11 | 6,12 | 5,63 | 5,62 |
| | 2,82 | 2,81 | 2,78 | 2,78 | 2,86 | 2,85 | 2,74 | 2,72 | 3,35 | 3,35 | 3,24 | 3,24 |
| | 2,89 | 2,87 | 2,88 | 2,88 | 2,98 | 2,97 | 2,92 | 2,90 | 3,62 | 3,62 | 3,52 | 3,52 |
| 001 | 5,42 | 5,39 | 5,10 | 5,10 | 4,53 | 4,51 | 4,52 | 4,48 | 6,44 | 6,45 | 6,12 | 6,11 |
| | 2,73 | 2,72 | 2,75 | 2,75 | 2,82 | 2,81 | 2,55 | 2,53 | 3,52 | 3,52 | 3,40 | 3,40 |
| | 2,97 | 2,95 | 2,83 | 2,83 | 2,88 | 2,87 | 2,72 | 2,70 | 3,66 | 3,66 | 3,55 | 3,55 |
| 110 | 5,53 | 5,57 | 5,33 | 5,32 | 5,27 | 5,32 | 4,71 | 4,74 | 6,05 | 6,07 | 5,57 | 5,61 |
| | 2,80 | 2,82 | 2,75 | 2,75 | 2,81 | 2,84 | 2,73 | 2,75 | 3,39 | 3,40 | 3,27 | 3,29 |
| | 2,97 | 2,99 | 2,80 | 2,80 | 2,89 | 2,92 | 2,82 | 2,84 | 3,69 | 3,70 | 3,52 | 3,54 |
| 101 | 5,56 | 5,62 | 5,22 | 5,23 | 4,92 | 4,97 | 4,66 | 4,75 | 6,75 | 6,73 | 5,65 | 5,66 |
| | 2,84 | 2,85 | 2,73 | 2,74 | 2,89 | 2,89 | 2,54 | 2,57 | 3,49 | 3,47 | 3,36 | 3,35 |
| | 3,06 | 3,07 | 2,88 | 2,89 | 2,99 | 2,99 | 2,75 | 2,78 | 3,62 | 3,60 | 3,49 | 3,47 |
| 011 | 5,49 | 5,59 | 5,14 | 5,13 | 4,39 | 4,39 | 5,03 | 4,97 | 6,37 | 6,28 | 5,94 | 5,91 |
| | 2,51 | 2,55 | 2,78 | 2,77 | 2,86 | 2,86 | 2,76 | 2,70 | 3,43 | 3,40 | 3,33 | 3,33 |
| | 2,72 | 2,76 | 2,82 | 2,81 | 2,89 | 2,89 | 3,05 | 2,98 | 3,77 | 3,74 | 3,57 | 3,57 |
| $\bar{0}\bar{1}\bar{1}$ | 5,50 | 5,66 | 5,28 | 5,24 | 5,30 | 5,29 | 4,35 | 4,17 | 6,20 | 6,11 | 5,80 | 5,79 |
| | 2,55 | 2,59 | 2,91 | 2,90 | 2,83 | 2,83 | 2,46 | 2,41 | 3,69 | 3,66 | 3,32 | 3,32 |
| | 2,74 | 2,78 | 2,95 | 2,94 | 2,92 | 2,92 | 2,59 | 2,53 | 3,71 | 3,68 | 3,54 | 3,54 |
| $\bar{1}\bar{1}\bar{0}$ | 5,59 | 5,71 | 5,14 | 5,11 | 5,08 | 5,13 | 5,07 | 4,99 | 6,21 | 6,19 | 5,34 | 5,37 |
| | 2,85 | 2,87 | 2,75 | 2,75 | 2,77 | 2,80 | 2,77 | 2,79 | 3,39 | 3,40 | 3,27 | 3,29 |
| | 2,89 | 2,91 | 2,84 | 2,84 | 2,85 | 2,88 | 3,17 | 3,19 | 3,70 | 3,71 | 3,41 | 3,43 |
| $\bar{1}\bar{0}\bar{1}$ | 5,47 | 5,53 | 4,88 | 4,89 | 4,58 | 4,62 | 4,86 | 4,94 | 6,10 | 6,08 | 5,83 | 5,84 |
| | 2,78 | 2,79 | 2,70 | 2,71 | 2,84 | 2,84 | 2,79 | 2,82 | 3,40 | 3,38 | 3,41 | 3,40 |
| | 2,85 | 2,86 | 2,77 | 3,78 | 2,90 | 2,90 | 2,96 | 2,99 | 3,59 | 3,57 | 3,53 | 3,51 |
| Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$ | 3110 | | 2900 | | 2900 | | 3060 | | 2950 | | 2680 | |

ным плоскостям поляризации излучателя и приемника. Погрешность определения скорости квазипродольной волны 0,3 %, а квазипоперечных волн 0,6 %. Погрешность определения углов ориентации направлений волновой нормали не более $\pm 4^\circ$. Экспериментальные значения фазовых скоростей и плотность пород представлены в табл. 2.

АКУСТИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

Акустический тензор μ_{ij} представляет собой положительно определенный симметричный тензор второго ранга, который можно получить из приведенного тензора упругих постоянных C_{ijkl}/ρ (ρ — плотность) путем свертки по внешней или внутренней паре индексов [10]. Квадратичная форма, образованная из компонент этого тензора и компонент единичного вектора волновой нормали \mathbf{n} , равна сумме квадратов фазовых скоростей трех изонормальных волн, которые распространяются вдоль этой волновой нормали, т. е.

$$\mu(\mathbf{n}) = \mu_{ij} n_i n_j = v_1^2 + v_2^2 + v_3^2, \quad (1)$$

где v_1 — фазовая скорость квазипродольной волны; v_2, v_3 — фазовые скорости „быстрой“ и „медленной“ квазипоперечных волн.

Свертка акустического тензора

$$\mu_{ii} = \mu_{11} + \mu_{22} + \mu_{33} \quad (2)$$

представляет собой его первый инвариант. Из соотношения (2) следует, что при распространении упругих волн в трех взаимно ортогональных направлениях анизотропной среды сумма квадратов фазовых скоростей является инвариантной величиной. Это свойство имеет важное значение при изучении горных пород, так как текстуры реальных горных пород, как правило, удовлетворяют лишь статистической симметрии [11]. Измеренные в них значения эффективных фазовых скоростей (v^*),

наряду с детерминированной ($\langle v \rangle$), содержат и некоторую флуктуационную (\tilde{v}) составляющую, обусловленную несовершенством строения текстуры, т. е.

$$v^* = \langle v \rangle + \tilde{v}. \quad (3)$$

Для сглаживания флуктуационной составляющей целесообразно применять операцию уравнивания измеренных фазовых скоростей [8, 9]. Для этого можно воспользоваться свойством первого инварианта акустического тензора, согласно которому в любых трех взаимно ортогональных направлениях куборомбододекаэдра сумма квадратов изонормальных скоростей есть величина постоянная для трехмерно регулярных текстур горных пород. Операция уравнивания и вычисления собственных векторов и значений детерминированной составляющей описаны в статьях [8, 9].

Результаты вычислений представлены в табл. 3. Достаточно узкие доверительные пределы найденных собственных значений детерминированной составляющей акустического тензора свидетельствуют о высокой эффективности операции уравнивания скоростей. Уравновешенные значения представлены в табл. 2.

Коэффициент акустической анизотропии A_μ определяется, согласно [10], как мера отклонения акустических констант анизотропной текстуры от ближайшей к ней изотропной текстуры. Величина A_μ вычислялась по формуле:

$$A_\mu = \left\{ \frac{1/3[(\langle u_{11} \rangle - \langle u_{22} \rangle)^2 + (\langle u_{11} \rangle - \langle u_{33} \rangle)^2 + (\langle u_{22} \rangle - \langle u_{33} \rangle)^2]}{\langle u_{11} \rangle + \langle u_{22} \rangle + \langle u_{33} \rangle} \right\}^{1/2} 100 \%, \quad (4)$$

где $\langle u_{11} \rangle$, $\langle u_{22} \rangle$, $\langle u_{33} \rangle$ — собственные значения детерминированной составляющей акустического тензора.

Величина коэффициента акустической анизотропии изменяется от 5,6 до 17,8 %. Формальное сопоставление собственных значений, с учетом их доверительных пределов, позволяет утверждать, что они удовлетворяют условию:

$$\langle u_{11} \rangle \neq \langle u_{22} \rangle \neq \langle u_{33} \rangle. \quad (5)$$

Это означает, что симметрия текстур гнейсов и амфиболитов не выше ромбической. Акустический тензор — положительно определенный симметричный тензор второго ранга, следовательно, его характеристическая поверхность — трехосный эллипсоид. Собственные значения ($\langle u_g \rangle$, $\langle u_p \rangle$, $\langle u_m \rangle$ — соответственно, наибольшее, наименьшее и промежуточные собственные значения акустического тензора) — полуоси акустического эллипсоида.

По аналогии с эллипсоидом деформации Флинна [12] можно ввести акустический параметр линейности $L_a = \mu_g / \mu_m$ и акустической сланцеватости $S_a = \mu_m / \mu_p$. Полученные результаты представлены на рис. 1 и характеризуют степень упорядоченности структурных элементов текстуры горной

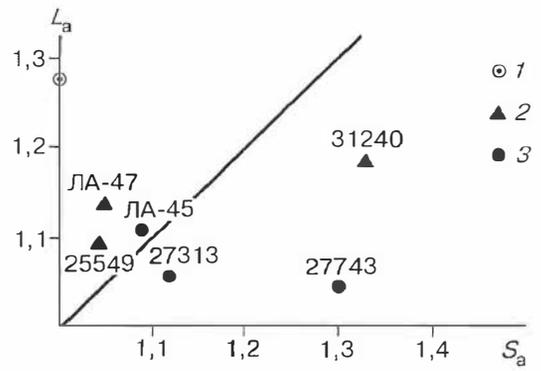
Таблица 3. Результаты вычисления собственных векторов и значений детерминированной составляющей

| Номер образца | $\frac{\langle u_{11} \rangle \pm \Delta}{e^{(1)}, m^{(1)}, n^{(1)}}$ | $\frac{\langle u_{22} \rangle \pm \Delta}{e^{(2)}, m^{(2)}, n^{(2)}}$ | $\frac{\langle u_{33} \rangle \pm \Delta}{e^{(3)}, m^{(3)}, n^{(3)}}$ | Коэффициент акустической анизотропии A_μ , % | Симметрия акустического тензора |
|---|---|---|---|--|---------------------------------|
| 25549 | $51,09 \pm 0,15$ 0,956; -0,187; 0,227 | $46,70 \pm 0,15$ 0,225; 0,961; -0,158 | $44,75 \pm 0,15$ -0,188; 0,202; 0,961 | 5,6 | <i>mmm</i> |
| 27313 | $36,47 \pm 0,06$ -0,752; 0,237; 0,615 | $45,39 \pm 0,05$ -0,066; -0,956; 0,287 | $43,13 \pm 0,06$ 0,656; 0,176; 0,734 | 6,8 | <i>mmm</i> |
| 27743 | $43,95 \pm 0,02$ 0,961; -0,021; 0,274 | $45,96 \pm 0,02$ -0,131; -0,911; 0,391 | $33,80 \pm 0,02$ -0,242; 0,412; 0,878 | 12,8 | <i>mmm</i> |
| 31240 | $46,26 \pm 0,15$ 0,842; -0,414; -0,344 | $32,01 \pm 0,16$ 0,538; 0,674; 0,506 | $29,38 \pm 0,15$ 0,023; -0,611; 0,791 | 17,8 | <i>mmm</i> |
| ЛА-47 | $60,4 \pm 0,1$ -0,721; -0,488; 0,492 | $62,3 \pm 0,1$ -0,395; 0,873; 0,286 | $70,6 \pm 0,1$ 0,569; -0,012; 0,822 | 6,9 | <i>mmm</i> |
| ЛА-45 | $50,89 \pm 0,01$ -0,881; 0,449; -0,147 | $55,28 \pm 0,01$ 0,456; 0,890; -0,019 | $61,70 \pm 0,01$ -0,122; 0,084; 0,989 | 7,9 | <i>mmm</i> |
| Модель текстуры амфиболита с однонаправленной ориентацией оси $C \parallel X_3$ | | | | 12,1 | ∞/mmm |

Примечание. Собственные значения и их доверительные пределы при 5 %-м уровне значимости ($10^6 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$ (над чертой)), собственные направления детерминированной составляющей акустического тензора образцов пород разреза Кольской СГС-3 (под чертой).

Рис. 1. Диаграмма параметров акустического эллипсоида текстур метаморфических пород керна Кольской СГС.

L_a — акустическая линейность, S_a — акустическая сланцеватость. l — модель амфиболита с однонаправленной ориентацией оси C амфиболита вдоль оси X_3 ; 2 — образцы гнейса и амфиболита ладожской серии; 3 — образцы керна кольской СГС-3.



породы вдоль отдельных направлений (акустическая линейность) или плоскостей (акустическая сланцеватость).

Чем дальше от начала координат располагаются точки, тем больше эллипсоид отличается от сферы, т. е. тем больше анизотропия.

Прямая линия на графике разграничивает аксиальные и планальные текстуры. Если эллипсоид одноосный, то точки должны ложиться на координатные оси и будут свидетельствовать о поперечно-изотропной симметрии текстуры. Как видно из графика рис. 1, гнейсы (обр. 27313, 27743) имеют достаточно выраженный плоскостной структурный мотив, подчеркнутый сланцеватостью. Текстура амфиболита (обр. 31240) также имеет плоскостно-структурный мотив. Однако для текстуры амфиболита обр. 25549 характерен линейно-плоскостной структурный мотив. Его анизотропия ничем не отличается от анизотропии амфиболита ЛА-47 с аксиальной текстурой ладожской серии, отобранного из обнажений на поверхности. Максимальное собственное значение акустического тензора, вероятно, совпадает с ориентировкой зерен роговой обманки [13].

Вообще говоря, собственное значение μ_g роговой обманки образует угол $9-19^\circ$ с кристаллографической осью c , а μ_p угол 27° с осью a [14]. Максимальное значение фазовой скорости волны продольной поляризации совпадает с направлением оси c и равно $8,13 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ [15]. Акустические константы модели текстуры с однонаправленной ориентацией оси c роговой обманки вдоль оси X_3 , вычисленные методом Фойхтга—Реусса—Хилла [16], приведены в табл. 3. Модель текстуры амфиболитов имеет поперечно-изотропную симметрию и ярко выраженный линейный структурный мотив (см. рис. 1). Результаты моделирования свидетельствуют, что анизотропия амфиболита (обр. ЛА-47 и 25549) обусловлена главным образом кристаллографической ориентацией оси c роговой обманки вдоль оси X_3 . Анизотропия амфиболита (обр. 31240) и гнейса (обр. 27743) связана с ориентированной первичной и вторичной микротрещиноватостью. Это согласуется с результатами математического моделирования акустических констант сланцеватого биотитового гнейса, приведенными в работе [17].

УПРУГИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Для вычисления регулярной составляющей упругих постоянных из уравновешенных значений измеренных фазовых скоростей использовалась итерационная система уравнений:

$$\langle C'_{ijkl} \rangle = \langle U_{i(p)}^q \rangle n_j^{(q)} n_k^{(q)} \langle U_{l(p)}^q \rangle = \rho^* [\bar{v}_{(p)}^{(q)}]^2; \quad (6)$$

$$\langle C'_{ijl} \rangle = \rho^* \langle u'_i \rangle; \quad (7)$$

$$\langle C'_{ijl} \rangle = \rho^* \langle u'_i \rangle; \quad (8)$$

$$p = 1, 2, 3; \quad q = 1, 1, \dots, 9;$$

где $\bar{v}_{(p)}^{(q)}$ и $\langle U_{l(p)}^q \rangle$ — уравновешенные значения фазовых скоростей изонормальных волн ($p = 1$ — квазипродольная волна; $p = 2$ и $p = 3$ — „быстрая“ и „медленная“ квазипоперечные волны) и их векторы смещений, вычисленные из текущего приближения упругих постоянных, при распространении волн вдоль $n_j^{(q)}$ -го направления нормали в рабочей системе координат: $\langle C'_{ijkl} \rangle$ — упругие постоянные в рабочей системе координат.

Выбор начального приближения для определения упругих постоянных детально описан в работах [8, 9]. Ковариационная матрица системы уравнений (6)—(8) дает оценки флуктуационной составляющей эффективного тензора упругих постоянных. Преобразования найденных упругих постоянных $\langle C'_{ijkl} \rangle$ в систему координат, базис которой совпадает с направлениями собственных векторов детерминированной составляющей акустического тензора, осуществляется с помощью формулы преобразования тензора четвертого ранга [10].

Таблица 4. Вычисленные значения детерминированной составляющей упругих постоянных ($\langle C_{mn} \rangle$, ГПа) и их доверительные пределы при 5 %-м уровне значимости для образцов пород разреза Кольской СГС-3

| Матричные индексы (m, n) | Номер образца | | | | | | Модель амфиболита (ось S роговой обманки $\parallel X_3$) |
|------------------------------|---------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|--|
| | 25549 | 27313 | 27743 | 31240 | ЛА-47 | ЛА-45 | |
| 11 | 93,7 ± 2,4 | 65,7 ± 0,6 | 77,3 ± 0,3 | 87,4 ± 2,6 | 111,7 ± 0,8 | 77,8 ± 0,1 | 130,8 |
| 22 | 91,9 ± 1,4 | 79,8 ± 1,1 | 84,5 ± 0,5 | 75,3 ± 2,0 | 113,8 ± 0,5 | 87,3 ± 0,1 | 130,8 |
| 33 | 83,5 ± 2,3 | 80,6 ± 0,5 | 51,5 ± 0,7 | 49,9 ± 1,0 | 139 ± 0,4 | 99,7 ± 0,1 | 189,9 |
| 44 | 21,8 ± 1,0 | 25,1 ± 0,6 | 22,6 ± 0,5 | 15,2 ± 1,0 | 36,3 ± 0,4 | 34,0 ± 0,1 | 42,3 |
| 55 | 34,1 ± 2,1 | 19,3 ± 0,4 | 23,9 ± 0,3 | 25,0 ± 1,0 | 32,7 ± 0,6 | 31,7 ± 0,1 | 42,3 |
| 66 | 31,3 ± 1,4 | 26,6 ± 0,7 | 26,2 ± 0,2 | 29,0 ± 2,2 | 33,8 ± 0,3 | 26,9 ± 0,1 | 40,8 |
| 12 | 56,2 ± 2,3 | 36,3 ± 1,6 | 34,0 ± 0,9 | 36,4 ± 3,3 | 32,2 ± 0,9 | 20,7 ± 0,1 | 49,5 |
| 13 | 41,8 ± 1,8 | 27,0 ± 0,9 | 13,7 ± 0,6 | 18,3 ± 1,6 | 29,4 ± 0,9 | 23,1 ± 0,1 | 62,5 |
| 23 | 59,4 ± 2,8 | 33,5 ± 1,4 | 19,8 ± 0,4 | 18,0 ± 3,2 | 41,6 ± 0,9 | 26,5 ± 0,1 | 62,5 |
| 14 | -6,7 ± 2,2 | -7,6 ± 1,1 | 0,4 ± 0,4 | 5,0 ± 2,1 | -6,7 ± 1,0 | -0,2 ± 0,1 | — |
| 15 | -3,7 ± 1,5 | -5,6 ± 1,2 | 0,0 ± 0,2 | 0,5 ± 0,7 | -8,7 ± 0,6 | 1,3 ± 0,1 | — |
| 16 | 5,0 ± 1,4 | 1,9 ± 0,6 | -1,1 ± 0,5 | -4,0 ± 1,5 | 6,3 ± 0,3 | -1,3 ± 0,1 | — |
| 24 | -7,6 ± 1,7 | -1,8 ± 1,0 | 0,1 ± 0,3 | 5,8 ± 1,6 | -6,2 ± 0,8 | 0,9 ± 0,1 | — |
| 25 | -5,9 ± 3,3 | -2,5 ± 0,5 | -3,2 ± 0,6 | -0,4 ± 1,4 | -3,2 ± 0,5 | 1,4 ± 0,1 | — |
| 26 | -6,4 ± 1,4 | -3,2 ± 0,7 | 1,0 ± 0,3 | 3,2 ± 1,8 | -3,5 ± 0,3 | 1,1 ± 0,1 | — |
| 34 | 5,2 ± 1,1 | 1,2 ± 0,7 | 0,1 ± 0,2 | -3,4 ± 1,0 | 4,1 ± 0,7 | -0,7 ± 0,1 | — |
| 35 | 7,0 ± 1,5 | 3,2 ± 0,8 | 0,4 ± 0,3 | 1,8 ± 1,0 | 4,9 ± 0,4 | -1,8 ± 0,1 | — |
| 36 | 2,9 ± 1,8 | 6,1 ± 1,0 | 1,5 ± 0,4 | -10,7 ± 1,9 | -3,1 ± 0,5 | 0,5 ± 0,1 | — |
| 45 | 1,7 ± 1,1 | 1,0 ± 0,3 | 0,3 ± 0,4 | 1,7 ± 0,7 | -3,0 ± 0,2 | 0,1 ± 0,1 | — |
| 46 | -3,0 ± 0,8 | 2,4 ± 0,6 | -0,3 ± 0,4 | -2,1 ± 1,0 | 3,6 ± 0,4 | 0,5 ± 0,1 | — |
| 56 | 2,1 ± 1,4 | 0,3 ± 0,8 | -0,1 ± 0,3 | -2,6 ± 1,8 | 2,1 ± 0,3 | -0,1 ± 0,1 | — |
| Упругая симметрия | $\bar{1}$ | $\bar{1}$ | mmm | $\bar{1}$ | $\bar{1}$ | mmm | ∞/mmm |

Вычисленные значения детерминированной составляющей эффективного тензора упругих постоянных ($\langle C_{mn} \rangle$) в триклинном приближении в стандартной акустической системе координат представлены в табл. 4. Статистическая проверка значимости отличия от нуля неглавных упругих постоянных для триклинного приближения свидетельствует, что не все их значения равны нулю. Вместе с тем, если отбросить эти значения упругих постоянных, то существенно нарушается согласие с экспериментальными значениями фазовых скоростей. Таким образом, ромбическое приближение для упругих постоянных не удовлетворяет экспериментальным данным. Представлять упругие постоянные целесообразно в триклинном приближении. Матрицу упругих постоянных более высокой симметрии можно найти методом аппроксимации, предложенным Ф. И. Федоровым [10], как матрицу, ближайшую по своим упругим свойствам к найденной матрице упругих постоянных в триклинном приближении.

ПАРАМЕТРЫ АНИЗОТРОПИИ ОБЪЕМНЫХ УПРУГИХ ВОЛН

Упругая симметрия налагает очень жесткие ограничения на азимутальную зависимость всех без исключения параметров анизотропии: фазовых и лучевых скоростей упругих волн, углов отклонения векторов смещений и лучей от направления волновой нормали, в мере проявления акустического двулучепреломления. Симметрия указательных поверхностей параметров анизотропии совпадает с симметрией текстуры горной породы (рис. 2 и 3). Указательная поверхность фазовой скорости волны с продольной поляризацией для текстуры гнейса ромбической симметрии имеет один локальный минимум, который совпадает с направлением оси X_3 , и четыре слабовыраженных максимума (см. рис. 2,а). Эти направления являются продольными нормальными, вдоль которых распространяются чисто продольные волны [10]. Это подтверждается стереопроекцией углов отклонения упругих смещений волны с продольной поляризацией от направления волновой нормали (см. рис. 2,б) (максимальные значения углов отклонения более 11°). Величина дифференциального коэффициента анизотропии достигает величин более 16 %. Его максимальные значения совпадают с направлениями продольных нормалей (см. рис. 2,б). Максимальная разность между скоростями „быстрой“ и „медленной“ поперечных волн более 0,23 км·с⁻¹. Имеется два направления, вдоль которых эта разница очень мала (см. рис. 2,в). Эти направления соответствуют акустическим осям [10].



Рис. 2. Стереопроекции указательных поверхностей параметров анизотропии текстуры меланократового гнейса (обр. 27743).

a — фазовой скорости квазипродольной волны (изолинии, $\text{км} \cdot \text{с}^{-1}$); *б* — коэффициента среднеквадратичной упругой анизотропии (изолинии, %); *в* — разности фазовых скоростей между „быстрой“ и „медленной“ поперечными модами (изолинии, $\text{км} \cdot \text{с}^{-1}$); *г* — углов отклонения векторов упругих смещений от направления волновой нормали квазипродольной волны (изолинии в градусах).



Рис. 3. Стереопроекции указательных поверхностей параметров анизотропии текстуры амфиболита (обр. 31240).

Усл. обозн. см. на рис. 2.

соответствует продольной нормали, так как угол отклонения вектора смещений для квазипродольной волны от направления волновой нормали минимален (см. рис. 3,г). Другие продольные нормали локализованы слабо.

В двух локализованных направлениях волновой нормали текстуры амфиболита разность между „быстрой“ и „медленной“ поперечными модами достигается максимальной величиной: более $0,78 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ (см. рис. 3,в). Это указывает на интенсивные эффекты расщепления волн поперечной поляризации. Обнаружены три акустические оси, не совпадающие с элементами симметрии текстуры амфиболитов.

Анизотропия скорости волны продольной поляризации ($A = (V_{\max} - V_{\min}) / V_{\min} \cdot 100 \%$) для минерала амфиболита равна 27,2 % [14, 15]. Величина коэффициента A для исследованного амфиболита (обр. 31240) равна 35 %. Можно полагать, что существенный вклад в анизотропию вносит ориентированная микротрещиноватость.

Максимальная величина дифференциального коэффициента упругой анизотропии составляет более 22 % (см. рис. 3,б), а величина угла отклонения вектора смещений волны продольной поляризации от направления волновой нормали — более 16 % (см. рис. 3,г). Углы отклонения вектора лучевой скорости от направления волновой нормали на 10—15 % выше.

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЙ МИНЕРАЛОВ И МИКРОТРЕЩИН

Инверсия азимутальной зависимости акустического тензора в ФРО минералов рассмотрена в работе [9]. Диаграмма ориентации оси *c* роговой обманки амфиболита (ЛА-47) ладожской серии представлена на рис. 4,а. Ось *c* роговой обманки ориентирована вдоль оси X_3 . Наблюдаемые отрицательные значения ФРО обусловлены обрывом ряда разложения по сферическим функциям при $l = 2$. Ось *c* роговой обманки амфиболита (обр. 25549) (см. рис. 4,б) ориентирована вдоль оси X_2 . Основной вклад в анизотропию амфиболитов вносит кристаллографическая ориентация роговой обманки.

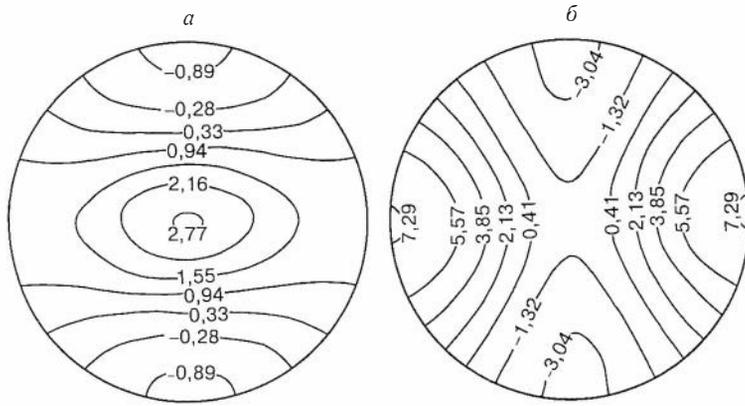


Рис. 4. Диаграмма функции распределения кристаллографической оси c роговой обманки амфиболита Кольской СГС по данным инверсии акустических констант (изолинии значений $4\pi q$).

a — обр. 25549, b — обр. ЛА-47.

симметричная компонента, c — для косинуса) [18]. В явной форме величины γ_s^{lmc} приведены в работе [19]:

$$126\gamma_s^{20c} = 3(\langle C_{11} \rangle + \langle C_{22} \rangle - 2\langle C_{33} \rangle) + (2\langle C_{12} \rangle - \langle C_{13} \rangle - \langle C_{23} \rangle) + 2(2\langle C_{66} \rangle - \langle C_{44} \rangle - \langle C_{55} \rangle), \quad (9)$$

$$42\gamma_s^{22c} = 3(\langle C_{11} \rangle - \langle C_{22} \rangle) + \langle C_{33} \rangle - \langle C_{23} \rangle + 2(\langle C_{44} \rangle - \langle C_{55} \rangle), \quad (10)$$

$$280\gamma_s^{40c} = 3(\langle C_{11} \rangle + \langle C_{12} \rangle) + \langle C_{33} \rangle + 2[\langle C_{12} \rangle - 4(\langle C_{13} \rangle - \langle C_{23} \rangle)] + 4[\langle C_{66} \rangle - 4(\langle C_{44} \rangle + \langle C_{55} \rangle)], \quad (11)$$

$$14\gamma_s^{42c} = \langle C_{11} \rangle - \langle C_{22} \rangle - 2(\langle C_{13} \rangle - \langle C_{23} \rangle) - 4(\langle C_{44} \rangle - \langle C_{55} \rangle), \quad (12)$$

$$8\gamma_s^{44c} = \langle C_{11} \rangle + \langle C_{22} \rangle - 2(\langle C_{12} \rangle + \langle C_{66} \rangle). \quad (13)$$

Функцию ориентации микротрещин можно также разложить в ряд по обобщенным сферическим функциям. Между коэффициентами разложения ФРО микротрещин W_{lmn} и γ_s^{lmc} , в случае однонаправленной ориентации микротрещин, установлена следующая зависимость [20, 21]:

$$\gamma_s^{20c} = \frac{4\sqrt{10}}{315} \pi^2 a_3 W_{200}; \quad (14)$$

$$\gamma_s^{22c} = -\frac{8\sqrt{15}}{315} \pi^2 a_3 W_{220}; \quad (15)$$

$$\gamma_s^{40c} = \frac{4\sqrt{2}}{105} \pi^2 a_1 W_{400}; \quad (16)$$

$$\gamma_s^{42c} = \frac{16\sqrt{5}}{105} \pi^2 a_1 W_{420}; \quad (17)$$

$$\gamma_s^{44c} = \frac{8\sqrt{35}}{105} \pi^2 a_1 W_{440}; \quad (18)$$

где

$$a_1 = \bar{C}_{11} + \bar{C}_{33} - 2(\bar{C}_{13} + 2\bar{C}_{44}); \quad (19)$$

$$a_3 = 4\bar{C}_{11} - 3\bar{C}_{33} - \bar{C}_{13} - 2\bar{C}_{44}; \quad (20)$$

\bar{C}_{mn} — упругие постоянные ориентационного „домена“ с однонаправленной ориентацией дискообразных микротрещин с плотностью, равной плотности микротрещин горной породы. Вычисление \bar{C}_{mn} осуществляется методом условных моментов [22].

Для вычисления полюсных диаграмм нормалей к микротрещинам $q(\varphi, \eta)$ используется представление Рое [23]:

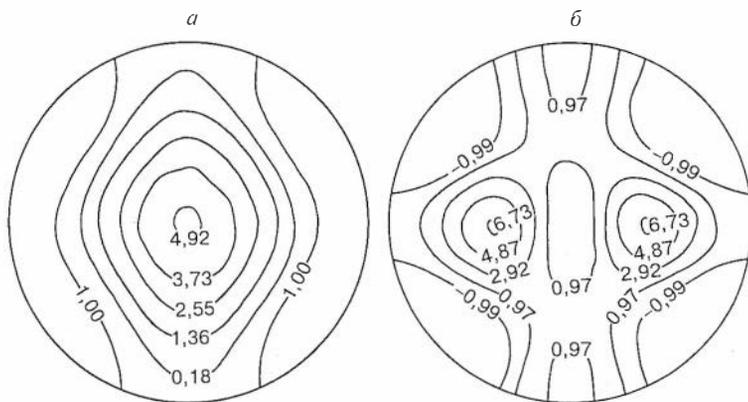
$$q(\varphi, \eta) = \sum_{l=0}^4 \sum_{m=-l}^l Q_{lm} P_l^m(\xi) e^{im\varphi}, \quad (21)$$

где $P_l^m(\xi)$ — нормализованный присоединенный полином Лежандра; $\xi = \cos \theta$; φ, θ — сферические координаты в системе координат образца горной породы;

$$Q_{lm} = 2\pi \left(\frac{2}{2l+l} \right)^{1/2} \sum_{n=-4}^4 W_{lmn} P_l^n(\eta) e^{in\varphi}. \quad (22)$$

Рис. 5. Диаграмма функции распределения нормалей к микротрещинам Кольской СГС по данным инверсии азимутальной зависимости упругих постоянных (изолинии значений $4\pi q$).

a — гнейса (обр. 27743), *б* — амфиболита (обр. 31240).



Здесь $\eta = \cos \alpha$; α, γ — ориентация нормалей к микротрещинам в системе координат ориентационного „домена“.

Полюсные диаграммы ориентации микротрещин гнейса (обр. 27743) и амфиболита (обр. 31240) представлены на рис. 5. Нормали к микротрещинам гнейса ориентированы вдоль оси X_3 (см. рис. 5, *a*). Микротрещины первичные и вторичные связаны со сланцеватостью текстуры гнейса.

Полюсная диаграмма ориентации нормалей микротрещин амфиболита (см. рис. 5, *б*), при локально выраженных интенсивных экстремумах, совпадающих с нормальными микротрещинами, ориентированными вдоль оси X_3 , имеет еще один менее интенсивный, который характерен для первичных микротрещин, связанных с расщеплением амфиболита. Два других направления находятся в плоскости $X_2 X_3$ под углом 30—45° к оси X_3 и соответствуют вторичным микротрещинам. Их возникновение связано с максимальными касательными остаточными напряжениями, действующими в плоскости $X_2 X_3$.

ВЫВОДЫ

Полученные экспериментальные данные об упругих постоянных образцов пород Кольской сверхглубокой скважины позволяют сделать достаточно обоснованные выводы относительно упругой симметрии пород керна, отобранных с больших глубин. Текстуры исследованных пород можно отнести к классу планальных и аксиальных текстур ромбической и триклинной симметрии.

В исследованных метаморфических породах, которые неоднократно подвергались тектоническим деформациям, анизотропия вызвана упорядоченностью микротрещин и минералов по форме (расплаивание) и кристаллографической ориентацией минералов. Упорядоченность микротрещин, индуцированная остаточными напряжениями, изменяется в пределах образца, отражая изменение локальных полей микронапряжений, обусловленное строением петроструктуры. Плотность микротрещин гнейса 0,4 и амфиболита — 0,8.

Формат микротрещин α ($\alpha = c/a$, c — короткая, a — длинная оси сфероидальной микротрещины) гнейса 0,0012 и амфиболита 0,0006, что согласуется с данными электронно-микроскопических исследований [23].

Популяции микротрещин в образцах гнейса и амфиболита достаточно локализованы, что свидетельствует о довольно интенсивных действующих напряжениях, близких к пределу прочности на разрыв. Это подтверждает выводы о том [23], что образование разрывов происходит путем слияния областей с большей плотностью микротрещин, групп микротрещин и микротрещин по границам раздела зерен.

Микротрещины могут открываться, закрываться, расти или прекращать рост в ответ на действие локальных напряжений, обусловленных взаимодействием неоднородностей (анизотропия линейной сжимаемости и теплового расширения породообразующих минералов, микротрещины сухие и флюидонасыщенные, поровое давление).

Прогнозные оценки сейсмической анизотропии, исходя лишь из кристаллографической ориентации породообразующих минералов, недостоверны, могут не соответствовать действительности. Анизотропия *in situ* может быть результатом многих взаимосвязанных факторов.

Анализ особенностей остаточного напряжения в буровых кернах является важным источником информации о поле современных и палеонапряжений на глубине. Остаточные напряжения определяются как система напряжений, которые существуют в равновесии или приближенном равновесии во внутренней области образца, когда ни нормальные, ни сдвиговые напряжения не передаются через его поверхность. На глубине достигается динамическое и термическое равновесие за счет напряжения, индуцированного упругой и пластической деформацией. Остаточная деформация может сохраняться в качестве реликта поля палеонапряжения. После извлечения и снятия нагрузки поля

напряжений буровой керн приспосабливается к новому условию со свободной от напряжения поверхностью. Это достигается за счет:

- а) мгновенного освобождения индуцированной деформации;
- б) частичной, зависящей от времени, релаксации вязкоупругого напряжения;
- в) перераспределения внутреннего или остаточного напряжений.

Наиболее важной особенностью, вызываемой перераспределением напряжений в образце породы, является формирование индуцированных остаточным напряжением микротрещин. Микротрещины сохраняют информацию о поле напряжений, ответственных за их формирование. Если трещины растяжения вызываются снятием нагрузки изотропной породы, то нормаль к плоскости трещины указывает ориентацию максимального сжимающего напряжения пород снятием нагрузки. Статистически трещины ориентированы преимущественно под углом 30° к оси макроскопического максимального напряжения [23]. Давление закрытия трещин является количественной оценкой величины максимального напряжения *in situ*. Ориентировочная теоретическая оценка давления закрытия микротрещин гнейса и амфиболита (в предположении упругой изотропии скелета и сухих микротрещин) — 700—1000 МПа, что представляет минимальную величину горизонтальных тектонических напряжений *in situ* на глубинах 8—9 км.

Процессы открытия и закрытия микротрещин в земной коре могут изменяться со временем даже в регионах, не подверженных воздействию больших девиаторных напряжений. Это означает, что пористость, проницаемость и поровое давление в земной коре изменяются во времени.

Исследование сейсмической анизотропии можно рассматривать как инструмент мониторинга напряженного состояния и геодинамики земной коры.

Авторы выражают благодарность Н. Б. Галдину за предоставление образцов керна для экспериментальных исследований и О. Г. Василенко за помощь при оформлении рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пузырев Н. Н., Тригубов А. В., Бродов Л. В. и др. Сейсмическая разведка методом поперечных и обменных волн. М., Недра, 1985, 277 с.
2. Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины. М., Недра, 1984, 490 с.
3. Горбачев Ф. Ф. Акустополярископия горных пород. Апатиты, Изд-во Кольск. фил. АН СССР, 1989, 202 с.
4. Кременецкий А. А., Овчинников Л. Н. Геохимия глубинных пород. М., Наука, 1986, 262 с.
5. Crampin S. Geological and Industrial Implications of Extensive — Dilatancy Anisotropy // Nature, 1987, v. 328, № 6130, p. 491—496.
6. Казаков А. Н., Миллер Ю. В., Дук В. Л., Харитонов А. Л. Структурная эволюция метаморфических комплексов. М., Наука, 1977, 270 с.
7. Продайвода Г. Т., Свиридов А. М., Лахтанов В. Г., Выжва С. А. Ультразвуковая аппаратура для исследования анизотропии горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1987, № 5, с. 97—102.
8. Продайвода Г. Т. Определение функции распределения ориентации оливина и упругой симметрии дунита по данным ультразвуковых измерений // Физика Земли, 1994, № 5, с. 42—52.
9. Aleksandrov K. S., Prodayvoda G. T. The study of elastic symmetry and anisotropy of elastic body waves in gneiss // Geophys. J. Int., 1994, v. 119, p. 715—728.
10. Федоров Ф. И. Теория упругих волн в кристаллах. М., Наука, 1965, 384 с.
11. Продайвода Г. Т. Принципы симметрии в петрофизике // Геологический журнал, 1978, т. 38, № 4, с. 61—69.
12. Флинн Д. Деформации при метаморфизме // Природа метаморфизма. М., Мир, 1967, с. 49—77.
13. Продайвода Г. Т. Акустические свойства метаморфических пород и сейсмическая анизотропия // Сов. геология, 1990, № 7, с. 100—107.
14. Продайвода Г. Т. О некоторых практически важных аналогиях между акустическими и оптическими явлениями в кристаллах // Зап. ВМО, 1978, ч. 107, вып. 2, с. 220—227.
15. Babushka V. Anisotropy of V_p and V_s in Rock-Forming Minerals // J. Geophys., 1981, v. 50, p. 1—6.
16. Беликов Б. П., Александров К. С., Рыжова Т. В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. М., Наука, 1970, 274 с.
17. Хорошун Л. П., Лещенко П. В., Продайвода Г. Т. Математическое моделирование эффективных петрофизических характеристик анизотропных горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1990, № 10, с. 63—75.
18. Bakus G. E. Geometrical picture of anisotropic elastic tensors // Revs. Geophys. Space Phys., 1970, v. 8, № 3, p. 633—671.

19. **Smith M. L., Dahlen F. A.** The Azimuthal Dependence of Love and Rayleigh wave Propagation in Slightly Anisotropic Medium // J. Geophys. Res., 1973, v. 78, № 17, p. 3321—3333.
20. **Morris P. R.** Averaging Fourth-Rank tensors with weight functions // J. Appl. Physics, 1969, v. 40, № 2, p. 447—448.
21. **Sayers C. M.** Angular Dependent Ultrasonic wave Velocities in Aggregates of Hexagonal Crystals // Ultrasonics, 1986, v. 24, № 1, p. 289—291.
22. **Продайвода Г. Т.** Акустичний метод визначення орієнтації мікротрещин у гірських породах // Вісн. Київського ун-ту, Геологія, 1992, вип. 2, с. 23—31.
23. **Kranz R. L.** Microcracks in Rocks: A Review // Tectonophysics, 1983, v. 100, № 1—3, p. 449—480.

*Рекомендована к печати 15 октября 1997 г.
С. В. Гольдиным*

*Поступила в редакцию 3 марта 1997 г.,
после доработки — 12 сентября 1997 г.*