

УДК 551.241+550.347.23

СРАВНЕНИЕ УПРУГО-АНИЗОТРОПНЫХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ПОРОД АМФИБОЛИТОВОЙ И ГРАНУЛИТОВОЙ ФАЦИЙ МЕТАМОРФИЗМА

© 2016 г. **Ф.Ф. Горбацевич, В.Р. Ветрин, О.М. Тришина, М.В. Ковалевский, В.Ф. Смолькин, Е.Н. Фомина**

*Геологический институт Кольского научного центра РАН,
ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, 184209 Россия. E-mail: gorich@geoksc.apatity.ru*

Поступила в редакцию 30.04.2015 г.

После исправления 10.08.2015 г.

Выполнено сравнение упруго-анизотропных свойств образцов пород амфиболитовой (Печенгский район, г. Кучин-тундра; 9 образцов преимущественно метагаббро и амфиболитов) и гранулитовой (о. Еловый, Кандалакшский залив Белого моря; 8 образцов гранатовых гранулитов) фаций метаморфизма. Определения показали, что величины скорости распространения продольных и поперечных волн в породах амфиболитовой фации – амфиболитах и метагаббро ($V_p = 6.91 \pm 0.11$ км/с, $V_s = 3.86 \pm 0.07$ км/с), несколько ниже, чем в гранатовых гранулитах ($V_p = 7.02 \pm 0.47$ км/с, $V_s = 3.97 \pm 0.36$ км/с). Величины и диапазон изменений коэффициентов и показателей анизотропии амфиболитов и метагаббро выше и шире ($A_p = 0.4\text{--}18\%$, $B_s = 5\text{--}15\%$), чем у гранатовых гранулитов ($A_p = 1.3\text{--}5.4\%$, $B_s = 1.7\text{--}5.0\%$). Полученные данные позволяют оценить петрофизические свойства пород амфиболитовой и гранулитовой метаморфических фаций, залегающих вблизи земной поверхности и на глубине.

Ключевые слова: амфиболитовая, гранулитовая фации, упруго-анизотропные свойства, плотность, скорости распространения продольных и поперечных волн.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования, включающие определения вариаций состава, плотности, упругих свойств, анизотропии упругих и поглощающих свойств, их неоднородности и др. на образцах разных фаций, имеют фундаментальное значение и представляют практический интерес. Например, скоростная анизотропия существенно усложняет волновые характеристики и пути распространения сейсмических волн, изменяет распределение напряжений в массивах пород. Известно, что скоростная анизотропия и неоднородность метаморфизованных пород, залегающих на глубинах 3–10 км, бывает сравнительно высокой [2], поэтому задача выявления изменчивости петрофизических, упруго-анизотропных параметров кристаллических пород в зависимости от интенсивности их метаморфической переработки на разных глубинах залегания крайне важна. Ее решение позволит увеличить достоверность интерпретации результатов сейсморазведочных работ в древних массивах горных пород с учетом возможной частотной

дисперсии скоростей на ультразвуковых частотах в проведенных экспериментах и сейсмических частотах в сейсморазведке.

Для правильной интерпретации результатов сейсмического зондирования метаморфических массивов большое значение имеет каталогизация петрофизических свойств пород разных фаций. Также представляет интерес детальное изучение и сравнение петрофизических свойств пород, залегающих на земной поверхности и на глубинах нижней коры.

Цель исследования – определение упругих и неупругих характеристик образцов метаморфических пород амфиболитовой и гранулитовой фаций метаморфизма, залегающих на разных глубинных горизонтах. Для исследований были выбраны два объекта.

В пределах Печенгской структуры (в районе г. Кучин-тундра) изучены обнажения амфиболитов (метадиабазов). Массивные лавовые потоки, в настоящее время представленные сланцеватыми амфиболитами, формировались в приповерхностных условиях и в палеопротерозое, были метаморфизо-

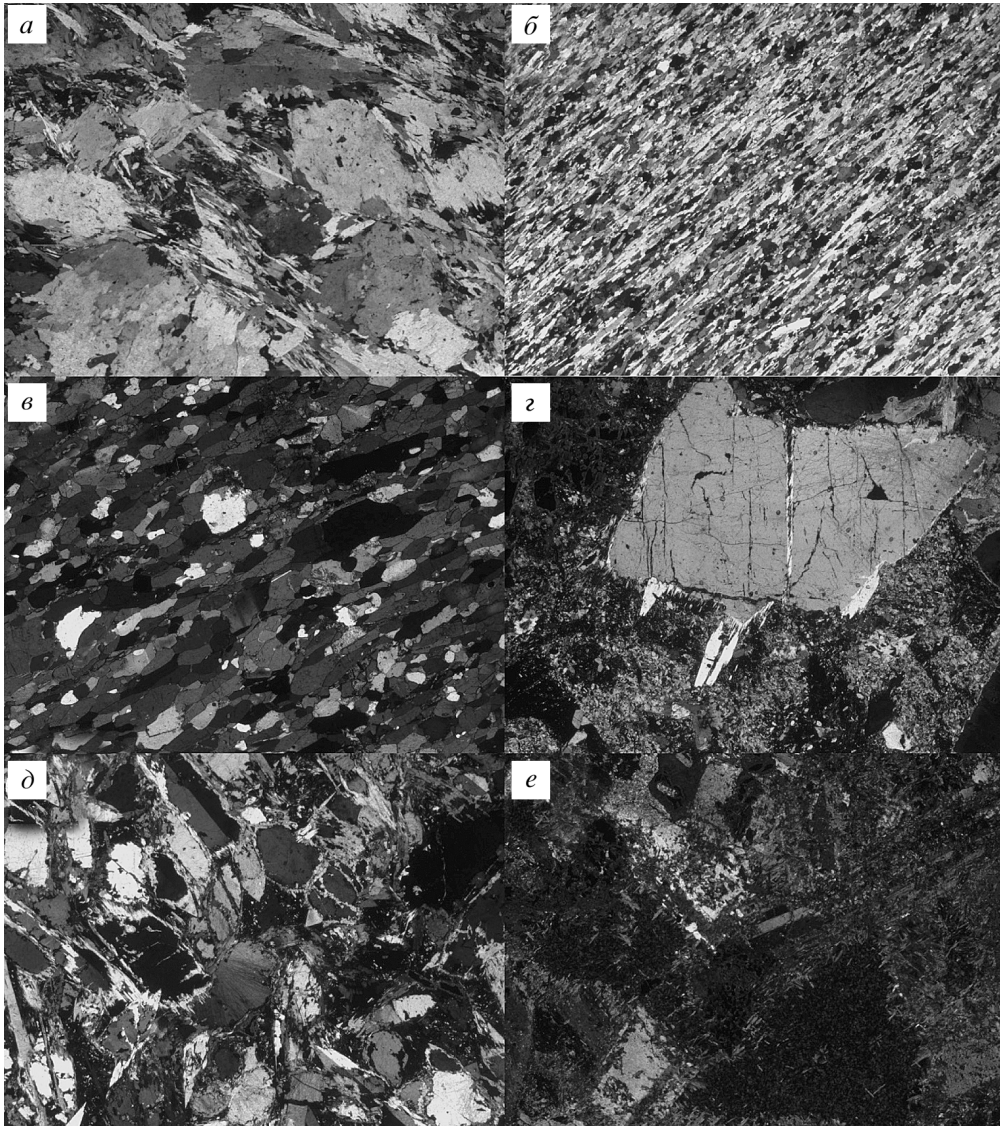


Рис. 1. Примеры фотографий шлифов образцов района г. Кучин-тундра (никколи скрещены). *a* – v-13-1731, *б* – v-13-1732, *в* – v-13-1734, *г* – v-13-1741-8, *д* – v-13-1741-9, *е* – v-13-1741-11.

ваны в условиях амфиболитовой фации. В южной части Кольского полуострова, в Кандалакшском заливе Белого моря на о. Еловом известна трубка взрыва, сложенная ультраосновными лампрофитами, содержащими многочисленные ксенолиты гранатовых гранулитов. Формирование гранатовых гранулитов происходило при P–T-параметрах, соответствующих глубине 25–40 км, что отвечает современной глубине залегания нижней коры региона. Их метаморфизм оценивается как гранулитовый.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБРАЗЦОВ

Основная часть района г. Кучин-тундра сложена преимущественно вулканогенными породами свиты матер, пересекаемых телами метагаббро.

В пределах вулканогенной части разреза залегают массивные лавовые потоки метадиабазов, превращенных в рассланцованные амфиболиты (метадиабазы), которые представлены мелкозернистыми, равномернозернистыми породами гранонематобластовой структуры [15]. Главные породообразующие минералы – амфибол (содержание ~75–80% в породе); кварц и полевой шпат (до ~20%); до 5% занимают рудные минералы. Структура метагаббро неравномернозернистая габбровая, пойкилитовая. Главные минералы – клинопироксен и плагиоклаз, которые вместе формируют магматическую ассоциацию. Максимальное содержание их в наименее измененных образцах до ~35%. Количество новообразованных метаморфогенных минералов (амфибол, биотит, карбонат) составляет 25–30%. До 5% занимает

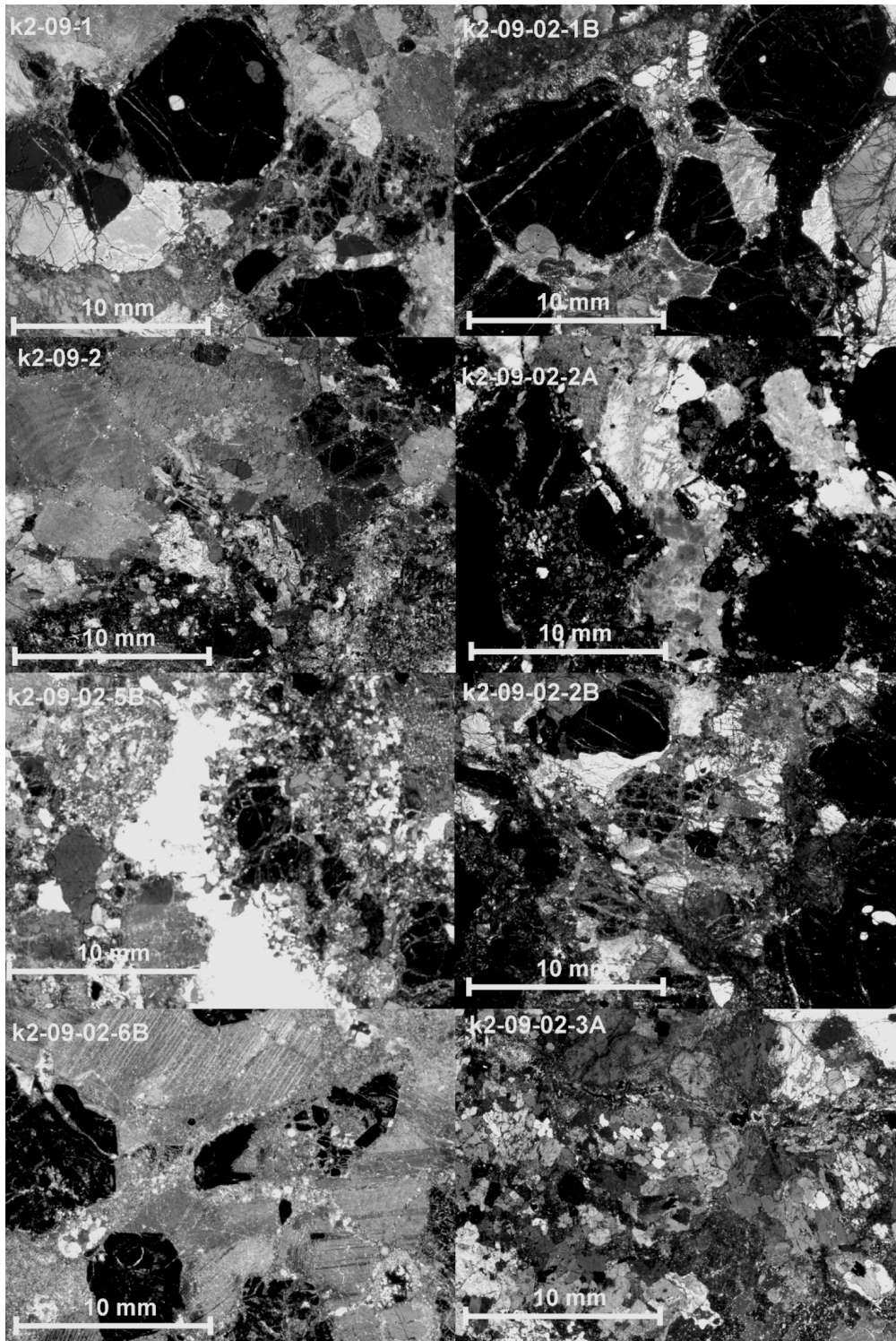


Рис. 2. Фотографии шлифов образцов k2-09-1, k2-09-2, k2-09-02-5B, k2-09-02-6B, k2-09-02-1B, k2-09-02-2A, k2-09-02-2B, k2-09-02-3A гранатовых гранулитов района г. Кучин-тундра (николи скрещены).

титанит, в качестве аксессуаров присутствуют рудные минералы (<1%). В пределах Печенгского массива (район г. Кучин-тундра) отобраны 9 образцов, преимущественно метагаббро и амфиболитов. Примеры фотографий шлифов образцов (николи скрещены) приведены на рис. 1.

На о. Еловом в пределах трубки взрыва отображены 8 образцов гранатовых гранулитов из ксенолитов в ультраосновных лампрофирах гранобластовой равномернoзернистой, гипидиобластовой, пойкилогранобластовой и порфиробластовой структур. Преобладающий размер зерен плагио-

клаза и граната – 1–5 мм. Проведенное ранее изучение вещественного состава рассматриваемых нижнекоровых ксенолитов [4, 12] позволяет предположить, что формирование нижней коры происходило в условиях высокой температуры и сопровождалось явлениями пластического течения материала в условиях гранулитовой фации метаморфизма.

В минеральном составе большинства образцов гранатовых гранулитов преобладает плагиоклаз, за исключением обр. № К2–09–02–1В, К2–09–02–2В, К2–09–02–4А, в которых основной минерал – гранат. Главный породообразующий минерал гранатового пироксенита (обр. К2–09–02–3А) и гранатового гранулита (обр. К2–09–02–2А) – клинопироксен, содержание которого составляет, соответственно, 60 и 42%. Акцессорные минералы – флогопит, апатит, рудные минералы, их доля не превышает 7%. Некоторые образцы гранатовых гранулитов инъецированы тонкими прожилками вмещающего ультраосновного лампрофира (УОЛ). Фотографии шлифов образцов (николи скрещены) гранатовых гранулитов приведены на рис. 2. Минеральный состав амфиболитов, метагаббро района г. Кучин-тундра и гранатовых гранулитов о. Еловый приведен в табл. 1.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

После соответствующих минералогических определений методом Архимеда провели измерения объемной плотности образцов (ρ). Определения упругих свойств провели методом акустополарископии [9] на образцах, изготовленных в форме куба (рис. 3). Нормали к трем взаимно перпендикулярным граням обозначены как направления 1–1', 2–2' и 3–3'.

Метод акустополарископии позволяет установить наличие и степень анизотропии пород, определить пространственную ориентировку и число элементов симметрии. Принципиальная схема наблюдений, осуществляемых по этому методу, не отличается от схемы, применяемой при поляризационных измерениях в оптике [6]. Достоинства и широта применения метода акустополарископии состоит в том, что в отличие от световых лучей ультразвук может проникать во все тела независимо от их толщины и прозрачности.

Для проведения акустополарископии разработан прибор акустополарископ [9]. В конструкции акустополарископа применяются преобразователи, излучающие интенсивные сдвиговые (поперечные) линейно-поляризованные колебания.

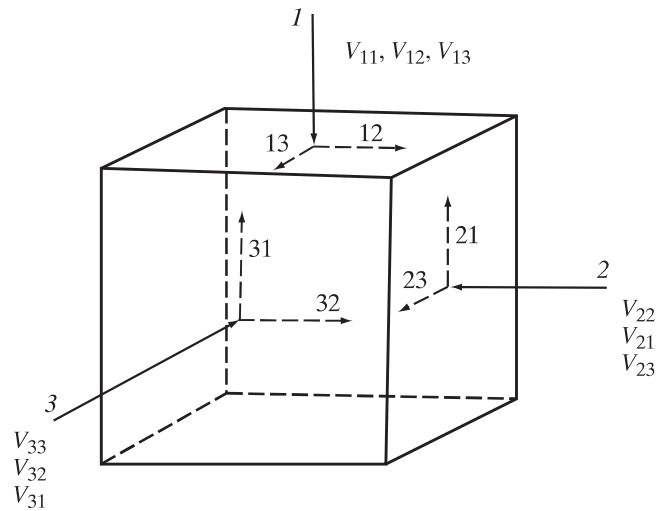


Рис. 3. Форма образца с индексацией продольных и поперечных скоростей, измеряемых на гранях куба.

Для передачи сдвиговых колебаний от преобразователей к образцу в качестве контактной среды используется высоковязкий раствор некристаллизующихся полисахаридов, хорошо проводящих сдвиговые колебания.

На первом этапе измерения проводятся при параллельных векторах поляризации излучателя и приемника колебаний (положение ВП). Измеряются амплитуды колебаний, прошедших образец. На втором этапе векторы поляризации преобразователей устанавливаются под прямым углом (положение ВС). Результат измерений – акустополариграммы ВП и ВС – круговые диаграммы изменения амплитуды огибающей импульса в пределах полного угла поворота поворотной платформы. По акустополариграммам ВП определяют наличие и степень проявления эффекта линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП); по акустополариграммам ВС, – число и направленность проекций элементов упругой симметрии анизотропного образца [9].

В последнее время определения проводятся при помощи приборного комплекса, состоящего из акустополарископа, ультразвукового прибора и настольного ПК. Отличительная особенность комплекса состоит в наличии автоматизированного привода поворотной платформы акустополарископа и состыковки регистрационной части прибора с ПЭВМ [14]. Полный цикл определений включает автоматическое построение акустополариграмм, полученных при параллельных (ВП) и скрещенных векторах поляризации (ВС).

После проведения акустополарископии измеряются величины скорости распространения

Таблица 1. Минеральный состав и структура амфиболитов, метагаббро района г. Кучин-тундра и гранатовых гранулитов о. Еловый

Номер образца	Наименование породы	Минеральный состав, %	Структура
Кучин-тундра			
v-13-1731	Амфиболит	Amp-98; Chl-1; Op-1	Средне-крупнозернистая, неравномерно-зернистая, с нематобластовой структурой
v-13-1732	Амфиболит полево-шпатовый	Amp-75; Kfs-20; Op-5	Мелкозернистая, равномернозернистая, с гранонематобластовой структурой
v-13-1737-1	Амфиболит	Amp-95; Op-5	Среднезернистая, равномернозернистая, с нематобластовой структурой, с тонкоигольчатым и сноповидным амфиболом
v-13-1734	Амфиболит полево-шпатовый	Qz-24; Pl-10; Op-1; Ttn-5; Amp-60	Порода среднезернистая, равномернозернистая, с гранонематобластовой структурой
v-13-1744-9	Метагаббро	Pl-30; Cpx-34; Amp-30; Ttn-6	Габбровая, пойкилитовая
v-13-1741-9	Метагаббро	Pl-34; Cpx-35; Amp-26; Ttn-5	Габбровая, пойкилитовая
v-13-1741-11	Метагаббро	Pl-34; Cpx-36; Amp-26; Ttn-4	Габбровая, пойкилитовая
v-13-1741-8	Метагаббро	Pl-35; Cpx-35; Amp-25; Ttn-5	Габбровая, пойкилитовая
v-13-1741-10	Метагаббро	Pl-33; Cpx-35; Amp-27; Ttn-5	Габбровая, пойкилитовая
о. Еловый			
K2-09-1	Гранатовый гранулит	Pl-68; Cpx-15; Gr-15; Phlog.-1; Op, Ap<1	Порфирограно-бластовая
K2-09-02-1B	“	Pl-25; Cpx-30; Gr-45; Phlog, Ap, Op<1	Порфирограно-бластовая
K2-09-2	Гранатовый гранулит	Pl-60; Cpx-15; Gr-15; Phlog-7; Op-3	Порфирограно-бластовая
K2-09-02-2A	Гранатовый гранулит, инъектированный прожилками УОЛ	Pl-20; Cpx-42; Gr-30; Phlog-5; Op, Ap-3	Гранобластовая равномерно-зернистая
K2-09-02-2B	Гранатовый гранулит	Pl-15; Cpx-20; Gr-60; Phlog-3; Op-2, Ap<1	“
K2-09-02-3A	Гранатовый пироксенит	Pl-30; Cpx-60; Gr-5; Phlog-5; Op<1	“
K2-09-02-5B	Гранатовый гранулит, инъектированный прожилками УОЛ	Pl-68; Cpx-10; Gr-15; Phlog-5; Op-2	Гранобластовая равномерно-зернистая, петельчатая
K2-09-02-6B	Гранатовый гранулит, инъектированный прожилками УОЛ	Pl-85; Gr-15	Пойкилограно-бластовая

Условные обозначения. Pl – плагиоклаз; Cpx – клинопироксен; Opх – ромбический пироксен; Gr – гранат; Ap – апатит, Op – рудный минерал; Phlog – флогопит; Amp – амфибол; Ttn – титанит; Qz – кварц; Kfs – полево шпат; Chl – хлорит; УОЛ – ультраосновной лампрофир (порода, вмещающая ксенолиты).

продольных и поперечных упругих колебаний в направлениях, совпадающих с ориентировкой выявленных элементов симметрии. Затем вычисляются коэффициенты и показатели анизотропии. Кроме этих данных определяется уровень проявления неупругих эффектов, таких как эффект ЛААП и др. Эффект ЛААП отражает степень по-

глощения поперечных волн при распространении через образец [9]. Измерения осуществляются на частоте ультразвукового диапазона 1.25 МГц. Наиболее подробно методика определений описана в работах [1, 14].

Результаты измерений на образцах величин скорости распространения продольных (V_p), по-

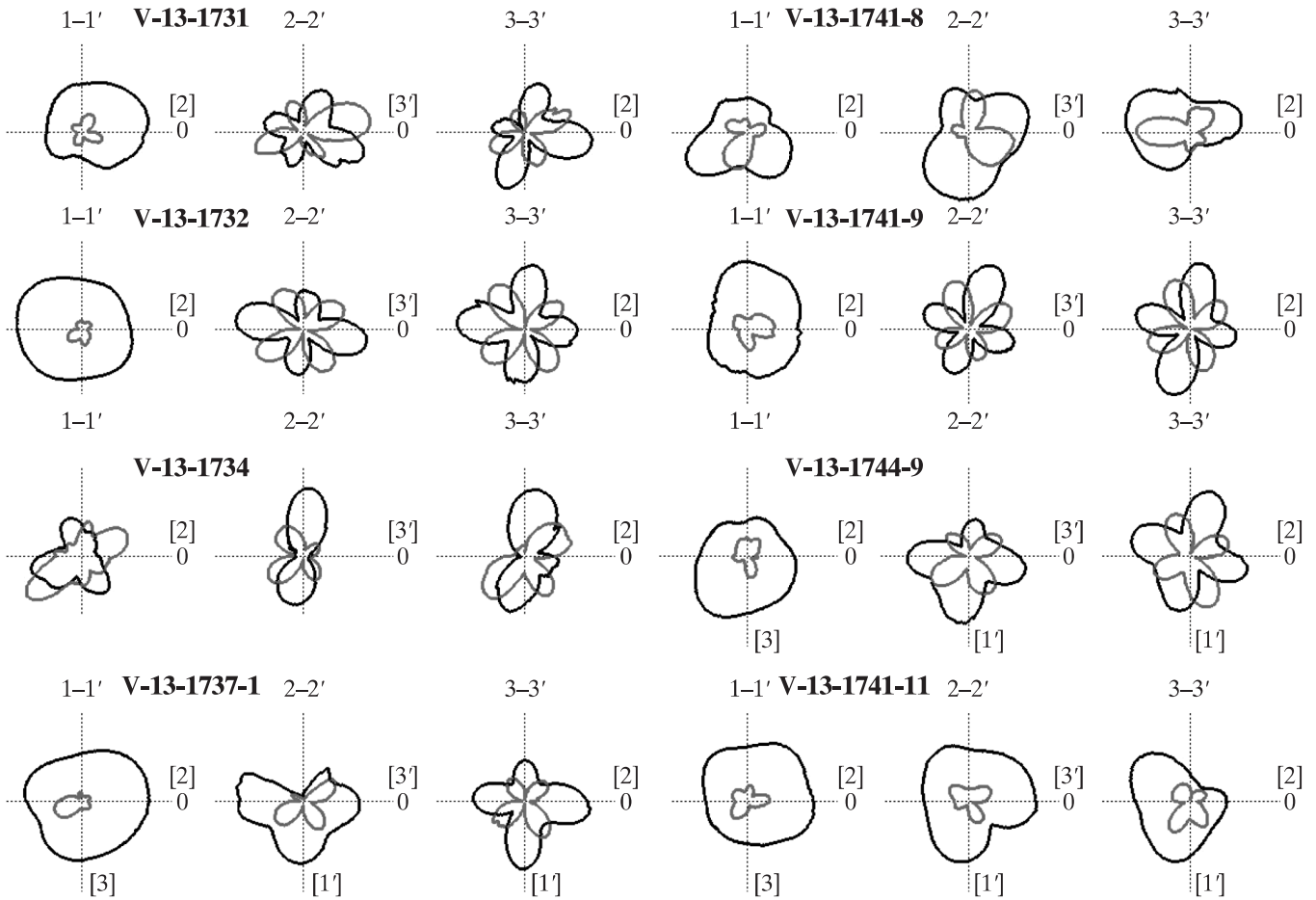


Рис. 4. Акустополариграммы образцов пород южной части Печенгской структуры (район г. Кучин-гундра). Темная линия – векторы параллельны (ВП), светлая – скрещены (ВС).

перечных (V_S) по всем граням кубического образца представляются в виде квазиматрицы V_{ij} :

$$\begin{matrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33}, \end{matrix} \quad (1)$$

где V_{11}, V_{22}, V_{33} – скорости распространения продольных колебаний, измеренные в направлениях 1–1', 2–2', 3–3'; скорости распространения поперечных колебаний, измеренные: V_{12}, V_{13} – в направлении 1–1' при ориентировке векторов поляризации (ОВП) в направлении 2–2', 3–3'; V_{21}, V_{23} – в направлении 2–2' при ОВП в направлении 1–1', 3–3'; V_{31}, V_{32} – в направлении 3–3' при ОВП в направлении 1–1', 2–2' соответственно.

Степень проявления эффекта ЛААП определяется по акустополариграмме, полученной при параллельных векторах поляризации, по формуле [9]

$$D = \frac{A_{nn} - A_{nc}}{A_{nn} + A_{nc}}, \quad (2)$$

где A_{nn}, A_{nc} – амплитуды наибольшего и наименьшего пропускания колебаний (наибольший и наименьший диаметры акустополариграммы ВП).

Для оценки степени анизотропии образца в целом по продольным колебаниям применили формулу [8] для расчета обобщенного коэффициента анизотропии, вычисляемого по величинам скорости продольных колебаний:

$$A_p = \frac{1}{V_{cp}} \sqrt{(V_{11} - V_{cp})^2 + (V_{22} - V_{cp})^2 + (V_{33} - V_{cp})^2}, \quad (3)$$

где $V_{cp} = (V_{11} + V_{22} + V_{33})/3$ – величина средней скорости распространения продольных колебаний в анизотропном образце.

Для оценки степени анизотропии образца по величинам скорости поперечных колебаний рассчитывали обобщенный коэффициент анизотропии B_S по формулам

$$B_S = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2}, \quad (4)$$

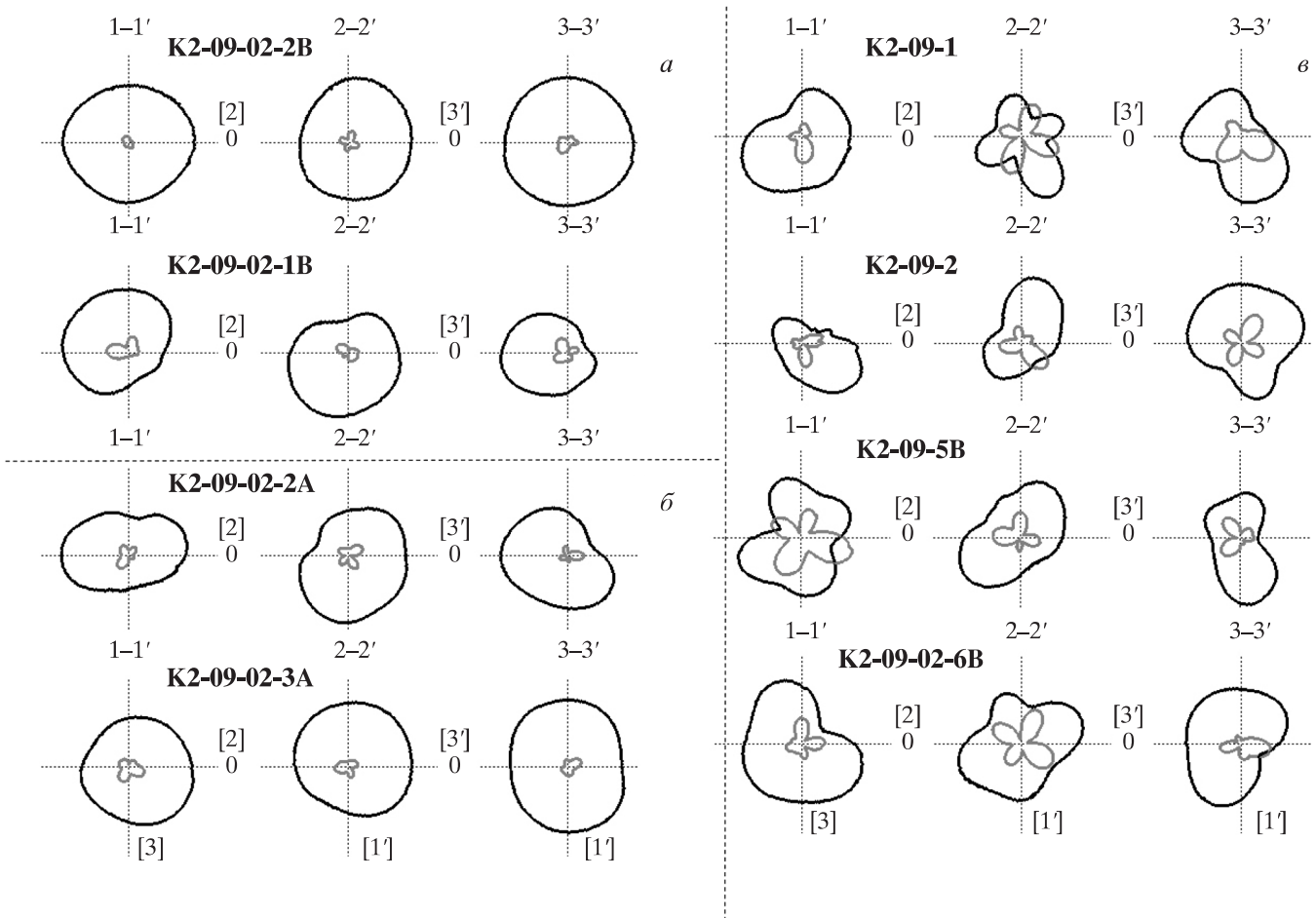


Рис. 5. Акустополариграммы образцов гранатовых гранулитов (о. Еловый, Кандалакшский залив Белого моря): образцы с преимущественным содержанием: *а* – граната; *б* – пироксена; *в* – плагиоклаза. Темная линия – векторы поляризации параллельны (ВП), светлая – скрещены (ВС).

где $B_1 = \frac{2 \cdot (V_{12} - V_{13})}{(V_{12} + V_{13})}$; $B_2 = \frac{2 \cdot (V_{21} - V_{23})}{(V_{21} + V_{23})}$;
 $B_3 = \frac{2 \cdot (V_{31} - V_{32})}{(V_{31} + V_{32})}$ – коэффициенты двулучепре-
ломления поперечных волн, определенных соот-
ветственно для направлений 1–1', 2–2', 3–3'.

Примеры акустополариграмм образцов амфи-
болитов и метагаббро (амфиболитовая фация) и
гранатовых гранулитов (гранулитовая фация) пред-
ставлены на рис. 4, 5. Вычисленные значения плот-
ности, коэффициентов анизотропии A_p , B_s , матри-
цы скорости V_{ij} , степени ЛААП (D), параметров
анизотропии представлены в табл. 2. Приведенный
в табл. 2 показатель D_1 получен в направлении
нормали к грани 1–1', D_2 – к грани 2–2', D_3 – 3–3'.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ акустополариграмм ВП и ВС амфибо-
литов (метагаббро), показывает, что у большей
части образцов наблюдаются симметричные

четырёхлепестковые фигуры, это означает нали-
чие в породах упругой анизотропии (рис. 4). На
большинстве акустополариграмм ВС можно про-
вести прямые линии, соединяющие минимумы
амплитуды проходящего через образец сигнала,
и тем самым определить пространственное поло-
жение проекций элементов упругой симметрии.
Особо отчетливо проекции элементов симметрии
выявляются на акустополариграммах образцов
v-13–1731, v-13–1732, v-13–1737–1, v-13–1741–9,
v-13–1744–9. Наблюдаемое отличие форм диа-
грамм (см. рис. 4) от теоретических [9] обуслов-
лено наличием структурных неоднородностей в
строении пород.

Сравнение акустополариграмм с текстурой,
отображенной в плоскости шлифов (см. рис. 1),
позволяет заметить, что директивность в очерта-
нии минеральных зерен сопровождается призна-
ками наличия анизотропии в акустополариграм-
мах ВП и ВС (см. рис. 4, шлифы v-1732, v-1734).
Хаотичное распределение очертаний минераль-

ных зерен и наличие скоплений мелких зерен в образцах v-1741–8, v-1741–11, v-1734 отразились на акустополяриграммах ВП и ВС. Явно выраженная ориентация зерен продолговатой формы в образце v-1734 привела к проявлению двух ярко выраженных эффектов в формах акустополяриграмм, – анизотропии и эффекта ЛААП.

Максимальное проявление ЛААП наблюдается в образце полевошпатового амфиболита (обр. v-1734, ось 1–1', $D_1 = 0.07$; ось 2–2', $D_2 = 0.78$; ось 3–3', $D_3 = 0.51$ (см. табл. 2)). Средняя степень ЛААП ($D > 0.1$) проявляется в образцах амфиболита (обр., v-1731, ось 1–1', $D_1 = 0.16$; ось 2–2', $D_2 = 0.11$), полевошпатового амфиболита (обр. v-1732, ось 1–1', $D_1 = 0.11$; ось 2–2', $D_2 = 0.22$) и метагаббро (обр. v-1741–8, ось 2–2', $D_2 = 0.15$; ось 3–3', $D_3 = 0.46$). На форму акустополяриграмм образцов также влияют неоднородности и разноориентированная микротрещиноватость. Несимметричная, угловатая форма акустополяриграмм ВП образцов v-1731, v-1734, v-1737–1, v-1741–8, v-1744–11 свидетельствует о существенном влиянии этих факторов на их упругие свойства.

Анализ результатов определений скорости распространения продольных и поперечных волн, представленных в табл. 2, показывает, что каждая из скоростных характеристик пород содержит определенную (детерминированную) и некоторую случайную (флуктуационную) составляющие. Наибольшие и наименьшие значения скорости распространения продольных и поперечных волн зарегистрированы соответственно в образцах амфиболита: обр. v-1737–1 ($V_{11} = 6.92$ км/с, $V_{13} = 3.84$ км/с), и полевошпатового амфиболита: обр. v-1734 ($V_{11} = 2.24$ км/с, $V_{21} = 2.1$ км/с). Коэффициенты и показатели анизотропии амфиболитов и метагаббро изменяются в довольно широких пределах: $A_p = 0.4–18\%$, $B_s = 5–15\%$.

Акустополяриграммы образцов гранатовых гранулитов с преимущественным содержанием граната и пироксена не позволяют определить пространственное положение элементов симметрии (рис. 5а, б). Минимумы на диаграммах ВС не выделяются или их трудно выделить. Диаграммы ВП близки к круговым, почти без наличия эффекта ЛААП. Это указывает на то, что эти образцы практически изотропны. Иные формы диаграмм ВП и ВС наблюдаются в образцах с большим содержанием плагиоклаза (рис. 5в). На акустополяриграммах ВС этих образцов практически на всех гранях выявляются элементы симметрии. Это означает наличие в них упругой анизотропии. Акустополяриграммы ВП (см. рис. 5в) уплощены,

что свидетельствует о заметном проявлении эффекта ЛААП.

В зернах плагиоклаза этот эффект обусловлен наличием спайности, и в образцах этого минерала он выражен гораздо сильнее, чем на приведенных примерах [8]. Снижение проявления эффекта ЛААП объясняется различной ориентировкой кристаллографических осей соседних зерен плагиоклаза в гранулитах, что подтверждается фотографиями шлифов (см. рис. 2).

Общие изменения D_1 , D_2 , D_3 находятся в пределах 0.01–0.42. Причем для гранат- и пироксенсодержащих пород (рис. 4а, б) эти пределы составляют 0.01–0.25. Наиболее существенное поглощение поперечных колебаний происходит на плоскостях спайности в минералах, таких как плагиоклаз, ортоклаз, микроклин и др. [8].

Согласно данным табл. 2, плотность образцов гранатовых гранулитов изменяется в пределах 2.49–2.98 г/см³. Верхние значения ρ обусловлены высоким содержанием граната (альмандин, $\rho = 4.18$ г/см³) и клинопироксена ($\rho = 3.17$ г/см³), нижние – преобладанием плагиоклаза ($\rho = 2.65$ г/см³) [3]. Известные данные показывают, что плотность пород довольно консервативная характеристика, сравнительно мало изменяющаяся при изменении РТ-условий, в которых находится порода [16].

Вариации значений скорости распространения продольных и поперечных волн в матрицах скоростей гранатовых гранулитов уже, чем в амфиболитах и метагаббро. Наибольшие и наименьшие значения скорости распространения продольных и поперечных волн отмечены соответственно в образцах гранатовых гранулитов: обр. k2–09–02–2В ($V_{22} = 6.66$ км/с, $V_{23} = 4.01$ км/с) и обр. k2–09–02–5В ($V_{11} = 5.83$ км/с, $V_{12} = 3.35$ км/с).

Рассчитанные по данным матриц скорости показатели упругой анизотропии изменяются в довольно узких пределах: $A_p = 1.3–5.4\%$, $B_s = 1.7–5.0\%$. Выявленные величины A_p и B_s в целом позволяют заключить, что образцы ксенолитов о. Еловый являются слабоанизотропными. Это можно объяснить тем, что преобладающими минералами в большинстве образцов являются гранат и клинопироксен. Эти минералы более изотропны, чем плагиоклаз и амфибол [3]. К тому же распределение кристаллоупругих элементов симметрии в минеральных зернах и сами зерна не обладают какой-либо преимущественной ориентацией (см. рис. 2).

Таблица 2. Упругие и неупругие характеристики образцов амфиболитов, метагаббро (район г. Кучин-тундра) и гранатовых гранулитов (о. Еловый, Кандалакшский залив Белого моря)

Номер образца	Наименование породы	Плотность, ρ , г/см ³	Матрица скорости, км/с	Коэффициент анизотропии, A_p %	Показатель анизотропии, B_S %	Эффект ЛААП $D_1 D_2 D_3$
Кучин-тундра						
v-13-1731	Амфиболит	3.06	5.49 3.39 3.51 3.56 6.35 3.80	16	12	0.16 0.11
v-13-1732	Амфиболит полевошпатовый	2.96	3.49 3.85 6.92 5.75 3.36 3.31 3.45 6.80 3.62	12	10	0.05 0.11 0.22
v-13-1737-1	Амфиболит	2.99	3.45 3.76 6.21 6.92 3.71 3.84 3.66 6.37 3.72	7	7	0.00 0.03 0.11
v-13-1734	Амфиболит полевошпатовый	2.87	3.66 3.46 6.32 2.24 2.14 2.12 2.10 4.72 2.87	53	31	0.04 0.07 0.78
v-13-1744-9	Метагаббро	3.01	2.36 2.38 4.83 5.43 3.28 3.33 3.52 6.24 3.63	10	6	0.01 0.06 0.06
v-13-1741-9	Метагаббро	3.10	3.36 3.53 5.91 4.49 3.26 3.17 3.18 5.75 3.51	18	15	0.03 0.09 0.14
v-13-1741-11	Метагаббро	2.95	3.16 3.51 5.49 4.97 3.02 3.15 3.06 5.02 3.19	3	8	0.03 0.02 0.14
v-13-1741-8	Метагаббро	3.29	3.13 3.30 5.18 5.35 3.30 3.43 3.29 5.55 3.35	3	5	0.01 0.15 0.46
v-13-1741-10	Метагаббро	3.09	3.36 3.48 5.55 5.91 3.37 3.64 3.52 5.94 3.47 3.51 3.46 5.91	0.4	8	0.12 0.06 0.01
о. Еловый						
k2-09-1	Гранатовый гранулит	2.89	6.06 3.55 3.56 3.51 6.11 3.55 3.46 3.61 6.17	1.3	4.2	0.22 0.09 0.49
k2-09-02-1B	То же	2.85	6.52 3.92 3.89 3.71 6.50 3.78 3.84 3.88 6.58	0.9	2.2	0.08 0.09 0.15
k2-09-2	—”—	2.84	6.14 3.53 3.66 3.72 6.48 3.76 3.69 3.82 6.14	4.5	5.0	0.29 0.38 0.03
k2-09-02-2A	—”—	2.91	6.24 3.79 3.76 3.95 6.46 4.02 3.90 3.95 6.49	3.0	2.3	0.33 0.12 0.25
k2-09-02-2B	—”—	2.98	6.22 3.83 3.82 4.00 6.66 4.01 3.78 3.84 6.27	5.4	1.7	0.06 0.06 0.01
k2-09-02-3A	Гранатовый пироксенит	2.83	6.29 3.69 3.68 3.98 6.55 3.90 3.77 3.74 6.46	2.9	2.1	0.03 0.04 0.09
k2-09-02-5B	Гранатовый гранулит	2.85	5.83 3.45 3.35 3.50 5.96 3.42 3.50 3.49 6.07	2.9	3.7	0.38 0.27 0.42
k2-09-02-6B	—”—	2.49	6.37 3.50 3.53 3.64 6.33 3.51 3.49 3.58 6.22	1.8	4.2	0.22 0.10 0.21

Таблица 3. Расчетные и измеренные плотности и скорости распространения волн образцов амфиболитов, метагаббро (район горы Кучин-тундра) и гранатовых гранулитов (о. Еловый, Кандалакшский залив Белого моря)

Номер образца	Наименование породы	ρ_R , Г/см ³	ρ_C , Г/см ³	V_{PR} , км/с	V_{PC} , км/с	V_{SR} , км/с	V_{SC} , км/с
Кучин-тундра							
v-13-1731	Амфиболит	3.06	3.18	6.25	7.19	3.60	3.98
v-13-1732	Амфиболит полево-шпатовый	2.96	3.12	6.25	6.91	3.33	3.82
v-13-1737-1	Амфиболит	2.99	3.14	6.53	7.15	3.68	4.00
v-13-1734	Амфиболит	2.87	3.06	3.93	6.77	2.33	3.94
v-13-1744-9	Метагаббро	3.01	3.07	5.86	6.95	3.44	3.86
v-13-1741-9	Метагаббро	3.10	3.10	5.24	6.89	3.30	3.82
v-13-1741-11	Метагаббро	2.95	3.01	5.06	6.89	3.14	3.82
v-13-1741-8	Метагаббро	3.29	3.29	5.48	6.88	3.37	3.81
v-13-1741-10	Метагаббро	3.09	3.09	5.92	6.91	3.49	3.83
Среднее		3.03	3.11	5.53	6.91	3.26	3.86
		±0.13	±0.08	±0.81	±0.11	±0.41	±0.07
о. Еловый							
K2-09-1	Гранатовый гранулит	2.89	2.92	6.11	6.68	3.54	3.73
K2-09-02-01B	То же	2.85	3.43	6.53	7.50	3.84	4.34
K2-09-2	—”—	2.84	2.85	6.25	6.65	3.70	3.73
K2-09-02-2A	—”—	2.91	3.23	6.40	7.24	3.89	4.15
K2-09-02-2B	—”—	2.98	3.55	6.38	7.73	3.88	4.57
K2-09-02-3A	Гранатовый пироксенит	2.83	3.03	6.43	6.86	3.79	3.81
K2-09-02-5B	Гранатовый гранулит	2.85	2.85	5.95	6.61	3.45	3.70
K2-09-02-6B	—”—	2.83	2.84	6.31	6.55	3.54	3.65
Среднее		2.87	3.11	6.32	7.02	3.73	3.97
		±0.056	±0.30	±0.19	±0.47	±0.17	±0.36

Ранее было обнаружено, что глубинные породы, вынесенные на земную поверхность, испытывают разуплотнение с образованием разгрузочных микротрещин [10, 13]. Для того чтобы приблизить величины скорости, полученные на разгруженных образцах к их значениям, которыми порода обладала бы на глубине, рассчитаны значения этих скоростей по минеральному составу. Расчеты выполнены по формуле [3]

$$\ln V_k = \frac{\sum \ln V_i P_i}{\sum P_i}, \quad (5)$$

где V_k – средняя расчетная скорость в породе, V_i – средняя скорость в каждом минерале, P_i – доля минерала в породе. По аналогичной формуле рассчитаны плотности тех же образцов.

В табл. 3 приведены рассчитанные по формуле (5) значения скорости продольных (V_{PC}) и поперечных (V_{SC}) волн, а также плотности ρ_C для двух групп образцов: амфиболитов, метагаббро и гранулитов. Там же даны экспериментально замерен-

ные значения плотности ρ_R и скорости продольных (V_{PR}) и поперечных (V_{SR}) волн, рассчитанные как средние по квазиматрицам V_{ij} . Перечисленные параметры вычислены как средние величин скорости продольных (см. формулу (3)) и поперечных волн: $V_{SR} = (V_{12} + V_{13} + V_{21} + V_{23} + V_{31} + V_{32})/6$ в образце.

Дополнительно к скоростным данным пород участка горы Кучин-тундра и ксенолитов о. Еловый на основе вычисленных ранее средних величин определены технические постоянные: модуль упругости E , модуль сдвига G и коэффициент Пуассона ν (табл. 4). Эти показатели рассчитаны по формулам:

$$E = [\rho V_S^2 (3V_P^2/V_S^2 - 4)] / (V_P^2/V_S^2 - 1),$$

$$G = \rho V_S^2,$$

$$\nu = (V_P^2/V_S^2 - 2) / (2V_P^2/V_S^2 - 2). \quad (6)$$

Данные табл. 3 показывают, что средние расчетные плотности приповерхностных амфибо-

Таблица 4. Модули упругости и коэффициенты Пуассона образцов амфиболитов, метагаббро (район горы Кучин-тундра) и гранатовых гранулитов (о. Еловый, Кандалакшский залив Белого моря)

Номер образца	Земная поверхность			Глубинные условия		
	$E \cdot 10^{-4}$, МПа	$G \cdot 10^{-4}$, МПа	ν	$E \cdot 10^{-4}$, МПа	$G \cdot 10^{-4}$, МПа	ν
Кучин-тундра						
v-13-1731	9.92	3.97	0.251	12.9	5.04	0.279
v-13-1732	8.54	3.28	0.301	11.7	4.55	0.280
v-13-1737-1	10.2	4.05	0.267	12.8	5.02	0.272
v-13-1734	3.83	1.56	0.229	11.8	4.75	0.244
v-13-1744-9	8.81	3.56	0.237	11.7	4.54	0.277
v-13-1741-9	7.91	3.38	0.171	11.6	4.52	0.278
v-13-1741-11	6.90	2.91	0.187	11.2	4.39	0.278
v-13-1741-8	8.94	3.74	0.195	12.2	4.78	0.279
v-13-1741-10	9.28	3.76	0.234	11.5	4.53	0.278
МАКС	10.2	4.05	0.301	12.9	5.04	0.280
МИН	3.83	1.56	0.171	11.2	4.39	0.244
СРЕДНЕЕ	8.05 ± 2.00	3.28 ± 0.78	0.228 ± 0.043	11.8 ± 0.5	4.63 ± 0.20	0.273 ± 0.012
о. Еловый						
K2-09-1	9.03	3.62	0.247	10.3	4.06	0.273
K2-09-02-01B	10.3	4.20	0.236	16.1	6.46	0.248
K2-09-2	9.56	3.89	0.230	10.1	3.97	0.270
K2-09-02-2A	10.4	4.40	0.183	14.0	5.56	0.255
K2-09-02-2B	10.9	4.49	0.209	18.3	7.41	0.231
K2-09-02-3A	9.97	4.07	0.227	13.3	5.71	0.166
K2-09-02-5B	8.46	3.39	0.247	10.3	3.90	0.272
K2-09-02-6B	9.01	3.55	0.270	9.64	3.78	0.275
МАКС	10.9	4.49	0.247	18.3	7.41	0.275
МИН	8.46	3.39	0.183	9.64	3.78	0.166
СРЕДНЕЕ	9.80 ± 0.85	4.00 ± 0.41	0.229 ± 0.028	13.1 ± 3.31	5.26 ± 1.41	0.245 ± 0.038

литов и метагаббро ($\rho_C = 3.11 \text{ г/см}^3$) отличаются в большую сторону от экспериментальных ($\rho_R = 3.03 \text{ г/см}^3$). Такое же различие наблюдается и для гранатовых гранулитов ($\rho_C = 3.11 \text{ г/см}^3$, $\rho_R = 2.87 \text{ г/см}^3$). Расчетные скорости в амфиболитах и метагаббро в целом больше величин, замеренных экспериментально на образцах при атмосферном давлении и температуре. Это отличие составляет 18–25%, а для гранатовых гранулитов – 6–9%. Величины скорости V_{PC} и V_{SC} для 9 образцов гранатовых гранулитов находятся в пределах 6.55–7.73 и 3.65–4.57 км/с соответственно. Это различие можно объяснить влиянием выветривания, из-за которого скорости в приповерхностных породах снижаются. Расчетные скорости в глубинных породах в среднем ненамного выше, чем в приповерхностных.

Такие же заключения можно сделать относительно различий в величинах модулей упругости

и сдвига (см. табл. 4), так как они являются производными от значений скорости, приведенных в табл. 3.

ВЫВОДЫ

Таким образом, для 8 образцов гранатовых гранулитов (о. Еловый) полученные средние расчетные скорости $V_{PC} = 7.02 \text{ км/с}$ и $V_{SC} = 3.97 \text{ км/с}$ адекватны величинам, которыми могла обладать порода, лишенная микротрещиноватости и находящаяся при РТ-условиях вблизи земной поверхности. Известно, что РТ-условия земных глубин существенно влияют на величины сейсмических скоростей в породах. Гранатовые гранулиты, по имеющимся оценкам, на глубине естественного залегания (25–40 км) находились под давлением 800–1400 МПа и температуре 700–930°C [5, 17]. Это предполагает их относительно высокую пластичность в условиях *in situ*, определявшую,

вероятно, существенную изотропность их напряженного состояния.

В работах [7, 11] показано, что градиент повышения плотности и скорости в нетрещиноватых породах при росте давления в среднем составляет $\sim 0.04\%$ на 100 МПа (для поперечной скорости $\sim 0.02\%$). Нагрев породы, как отобранной на поверхности, так и глубинной, снижает на каждые 100°C плотность и скорость продольных и поперечных волн на $\sim 0.7\text{--}0.8\%$. В соответствии с приведенными градиентами следует ожидать, что средние величины плотности гранатовых гранулитов на глубине 25–40 км в среднем составят $3.1\text{--}3.2\text{ г/см}^3$. Оценка величин скорости продольных и поперечных волн, с учетом приведенных выше градиентов, позволяет для глубин 25–40 км получить для $V_p = 6.7\text{--}7.0\text{ км/с}$, $V_s = 3.8\text{--}3.9\text{ км/с}$.

Экспериментальные измерения, полученные на образцах приповерхностных пород (амфиболиты и метагаббро), показывают существенные вариации плотности, скорости распространения продольных и поперечных волн. Эти вариации в среднем достигают 13–15%. Разброс значений расчетных данных для тех же образцов составляет 1.6–1.8%, что можно объяснить приповерхностным выветриванием пород, поэтому в данном случае сравнение петрофизических свойств пород для цели их оценки *in situ* лучше проводить по расчетным показателям. В этом отношении величины скорости распространения продольных и поперечных волн в породах амфиболитовой фации – амфиболитах и метагаббро ($V_p = 6.91 \pm 0.11\text{ км/с}$, $V_s = 3.86 \pm 0.07\text{ км/с}$), не намного ниже, чем в породах гранулитовой фации – гранатовых гранулитов ($V_p = 7.02 \pm 0.47\text{ км/с}$, $V_s = 3.97 \pm 0.36\text{ км/с}$). Вместе с этим они отличаются по показателям упругой анизотропии. Прежде всего это видно по формам акустополяриграмм. Величины и диапазон изменений коэффициентов и показателей анизотропии амфиболитов и метагаббро выше и шире ($A_p = 0.4\text{--}18\%$, $B_s = 5\text{--}15\%$), чем у гранатовых гранулитов ($A_p = 1.3\text{--}5.4\%$, $B_s = 1.7\text{--}5.0\%$). Вероятно, это можно объяснить тем, что на глубинах 25–40 км распределение поля напряжений близко к квазигидростатическому.

Работа выполнена по тематике проектов Российского фонда фундаментальных исследований № 07-05-00100-а, 10-05-00082-а, 13-05-00125-а, 16-05-00026-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акустополариметрия и определение упругой симметрии горных пород. Методические рекомендации / Составители Горбацевич Ф.Ф., Балаганский В.В.,

Иванова Н.Г. Апатиты: Кольский научный центр АН СССР, 1990. 83 с.

2. Аллисон А., Палмер Д. Геология. М.: Мир, 1984. 568 с.
3. Беликов Б.П., Александров К.С., Рыжова Т.В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. М.: Наука, 1970. 276 с.
4. Ветрин В.Р. Состав и строение нижней коры Беломорского подвижного пояса, Балтийский щит // Петрология. 2006. Т. 14. № 4. С. 415–438.
5. Ветрин В.Р., Калинин М.М. Реконструкция процессов внутрикорового и корово-мантийного магматизма и метасоматоза. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1992. 110 с.
6. Волкова Е.А. Поляризационные измерения. М.: Изд-во стандартов, 1974. 156 с.
7. Головатая О.С., Горбацевич Ф.Ф., Керн Х., Попп Т. Свойства некоторых пород из разреза Кольской сверхглубокой скважины при изменении РТ-параметров // Физика Земли. 2006. № 8. С. 1–12.
8. Горбацевич Ф.Ф. Акустополарископия породообразующих минералов и кристаллических пород. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2002. 140 с.
9. Горбацевич Ф.Ф. Акустополарископия горных пород. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1995. 203 с.
10. Горбацевич Ф.Ф., Медведев Р.В. Механизм разуплотнения кристаллических горных пород при их разгрузке от напряжений // Рудные геофизические исследования на Кольском полуострове. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1986. С. 83–89.
11. Горбацевич Ф.Ф., Ветрин В.Р., Тришина О.М., Ковалевский М.В. Модель изменений свойств и состояния пород верхней, средней и нижней континентальной коры Кольско-Норвежского блока, Кольский полуостров // Физика Земли. 2014. № 4. С. 56–69.
12. Горбацевич Ф.Ф., Ветрин В.Р., Тришина О.М., Ковалевский М.В. Результаты экспериментального изучения упруго-анизотропных свойств гранатовых гранулитов нижней коры Беломорского подвижного пояса // Физика Земли. 2012. № 1. С. 82–96.
13. Горяинов П.М., Давиденко И.В., Горбацевич Ф.Ф., Ланев В.С., Медведев Р.В., Смирнов Ю.П. Теоретические и экспериментальные основы тектоно-кессонного эффекта (явления дезинтеграции), геодинамические следствия / Глубинное строение и геодинамика кристаллических щитов Европейской части СССР. Апатиты: Кольский научный центр АН СССР, 1992. С. 136–144.
14. Ковалевский М.В. К вопросу о совершенствовании методики исследований упругих характеристик геоматериалов методом акустополарископии // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента // Матер. 12-й научн.

- конф. И.Н. Бурцев (отв. ред.) и др. Сыктывкар: Геопринт, 2003. С. 123–125.
15. Петров В.П. Метаморфизм раннего протерозоя Балтийского щита. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1999. 325 с.
 16. Строение литосферы российской части Баренц-региона / Под ред. Н.В. Шарова, Ф.П. Митрофанова, М.Л. Вербы, К. Гиллена. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005. 318 с.
 17. Kempton P.D., Downes H., Sharkov E.V. et al. Petrology and geochemistry of xenoliths from the Northern Baltic Shield: evidence for partial melting and metasomatism in the lower crust beneath an Archaean terrane // *Lithos*. 1995. V. 36. P. 157–184.
 - crystalline rocks]. Apatity, Kola Sci. Centre of RAS, 2002, 140 p. (in Russian).
 9. Gorbatshevich, F.F. 1995. *Akustopolyariskopiya gornyykh porod* [Acoustopolariscopy of rocks]. Apatity, Kola Sci. Centre of RAS, 2002, 204 p. (in Russian).
 10. Gorbatshevich, F.F., Medvedev, R.V. [Decompaction mechanism of crystalline rocks under stress release]. *Rudnye geofizicheskie issledovaniya na Kol'skom poluostrove* [Ore geophysical investigations on the Kola Peninsula], Apatity, Kola Branch of USSR Ac. Sci. 1986, pp. 83–89 (in Russian).
 11. Gorbatshevich, F.F., Vetrin, V.R., Trishina, O.M., Kovalevsky, M.V. *Model izmenenii svoistv i sostoyaniya porod verkhnei, srednei i nizhnei kontinental'noi kory Kol'sko-Norvezhskogo bloka, Kol'skii poluostrov* [Model of changes in the properties and state of rocks of the upper, middle and lower continental crust of the Kola-Norwegian block, Kola Peninsula]. *Fizika Zemli*, 2014, no. 4, pp. 56–69 (in Russian).
 12. Gorbatshevich, F.F., Vetrin, V.R., Trishina, O.M., Kovalevsky, M.V. *Rezultaty eksperimental'nogo izucheniya uprugo-anizotropnykh svoistv granatovykh granulitov nizhnei kory Belomorskogo podvizhnogo poyasa* [Results of the experimental study in elastic-anisotropic properties of garnet granulite of the lower crust of the Belomorsky mobile belt]. *Fizika Zemli*, 2012, no. 1, pp. 82–96 (in Russian).
 13. Goryainov, P.M., Davidenko, I.V., Gorbatshevich, F.F. et al. [Theoretical and experimental fundamentals of the tectono-caisson effect (disintegration phenomenon), geodynamic consequences]. *Glubinnoe stroenie i geodinamika kristallicheskih shchitov Evropeiskoi chasti SSSR*. [Deep structure and geodynamics of crystalline shields in the USSR European part]. Apatity, Kola Sci. Centre of USSR Ac. Sci., 1992, pp. 136–144 (in Russian).
 14. Kovalevsky, M.V. [On improvement of methods for investigating elastic characteristics of geomaterials by the acoustopolariscopy method]. *Struktura, veshchestvo i istoriya litosfery Timano-Severoural'skogo segmenta. Mater. 12 nauchnoi konf.* [Substance, matter, lithosphere history of the Timan-Northern Ural segment. Proc. 12th Scientific Conference]. Ed. Burtsev, I.N. Syktyvkar, Geoprint. 2003, pp. 123–125 (in Russian).
 15. Petrov, V.P. Метаморфизм раннего протерозоя Балтийского щита [Metamorphism of the Early Proterozoic era in the Baltic shield]. Apatity, Kola Sci. Centre of RAS, 1999, 325 pp. (in Russian).
 16. *Stroenie litosfery rossiiskoi chasti Barents-regiona* [The lithosphere structure of the Russian part of the Barents Region]. N.V. Sharov, F.P. Mitrofanov, M.L. Verba, C. Gillen, Eds Karelian Science Centre of RAS, Petrozavodsk, 2005, 318 pp. (in Russian).
 17. Kempton, P.D., Downes, H., Sharkov, E.V. et al. Petrology and geochemistry of xenoliths from the Northern Baltic Shield: evidence for partial melting and metasomatism in the lower crust beneath an Archaean terrane // *Lithos*. 1995. Vol. 36. P. 157–184.

REFERENCES

COMPARISON OF ELASTIC-ANISOTROPIC PROPERTIES OF ROCKS SAMPLED FROM AMPHIBOLITE AND GRANULITE METAMORPHIC FACIES

F. F. Gorbatsevich, V. R. Vetrin, O. M. Trishina, M. V. Kovalevskii,
V. F. Smol'kin, E. N. Fomina

Geological Institute, Kola Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Fersmana 14, Apatity, 184209 Russia. E-mail: gorich@geoksc.apatity.ru

Elastic-anisotropic properties of rocks sampled from amphibolite (Pechenga) and granulite (Elovy Island, Kandalaksha Bay of the White Sea) metamorphic facies were compared. Nine samples mainly of metagabbro and amphibolite composition were collected at the Pechenga massif (Mt. Kuchin, tundra area). The rocks contain amphibole, quartz, feldspar, and ore minerals in the amount of up to 5%. The metagabbro structure is unevenly grained, poikilitic. Eight samples of garnet granulite were collected at Elovy Island. The rock structure is granoblastic evenly grained, poikilitic and porphyroblastic. Plagioclase and garnet dominate in the mineral composition of the majority of garnet granulite samples. Clinopyroxene is the main rock-forming mineral of garnet pyroxenite (up to 60%). The content of accessory minerals, i.e., phlogopite, apatite and ore minerals, do not exceed 7%. Some samples of garnet granulite are injected by thin streaks of host ultrabasic lamprophyre (UBL).

The volume density of the samples was measured by the Archimedes method. The elastic properties were determined by the acoustopolariscopy method at the cubic-shaped samples. Nine values of elastic wave velocities (3 compression and 6 shear waves) were obtained for every sample.

The experiments performed for the samples of near-surface rocks (amphibolite and metagabbro) show substantial variations in density and velocity of compression and shear waves. On the average, these variations reach 13–15%. The scatter in values of the calculated data for the same samples is 1.6–1.8%. The scatter experimental results can be explained by the near-surface weathering of rocks. Therefore, in this case, the petrophysical properties of rocks *in situ* should be evaluated on the basis of calculated values. The calculations proved that the velocities of compression and shear waves in the rocks of amphibolite facies, i.e., amphibolite and metagabbro ($V_p = 6.91 \pm 0.11$ km/s, $V_s = 3.86 \pm 0.07$ km/s) were slightly below those in the rocks of granulite facies, i.e., garnet granulites ($V_p = 7.02 \pm 0.47$ km/s, $V_s = 3.97 \pm 0.36$ km/s). At the same time, they differ in the elastic anisotropy values, which is manifested in the acoustopolarigram shapes. The values and range of the changes in the factors and indices of anisotropy for amphibolite and metagabbro are higher and wider ($A_p = 0.4\text{--}18\%$, $B_s = 5\text{--}15\%$) than those for garnet granulites ($A_p = 1.3\text{--}5.4\%$, $B_s = 1.7\text{--}5.0\%$).

Probably this can be explained by the fact that at a depth of 25–40 km the distribution of the stress field is close to quasihydrostatic. The technical indices of rocks, i.e., elasticity modulus and Poisson's ratio, are given in the paper. The data obtained allow one to assess petrophysical properties of rocks of amphibolite and granulite metamorphic facies that occur near the Earth's surface and at depth.

Keywords: *amphibolite facies, granulite facies, elastic-anisotropic properties, density, velocity of compression and shear waves.*