

**АНИЗОТРОПИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД ЦЕНТРАЛЬНОЙ
ЧАСТИ КОЛЬСКО-НОРВЕЖСКОГО БЛОКА,
БАЛТИЙСКИЙ ЩИТ (УЧАСТОК ТУЛОМА)**

**М.В. Ковалевский, Ф.Ф. Горбацевич, В.Р. Ветрин, О.М. Тришина (Геологический институт
КНЦ РАН)**

В работе приведены результаты экспериментального изучения анизотропии упругих свойств метаморфических горных пород центральной части Кольско-Норвежского блока – плагиоамфиболитов, биотитовых гнейсов и гранитоидов (лейкограниты, тоналиты, эндербиты). Исследования проводились с использованием акустопляризации метода. Диапазон изменений значений плотности составляет 2,46–3,27 г/см³, скоростей распространения продольных волн 2,86–6,52 км/с, поперечных 2,0–3,65 км/с. Выявлены широкие вариации скоростной анизотропии пород, обусловленной изменчивостью состава и степенью их метаморфической переработки.

Введение

Для земной коры Балтийского щита по результатам сейсмических исследований и изучения глубинных пород принята трех- или пятислойная модель строения со сложной слоисто-блоковой структурой, отражающей многоэтапность ее тектономагматической и метаморфической переработки [4, 8, 25, 27, 29]. В пятислойной модели строения помимо базовых (верхней, средней и нижней коры) выделяются: слой с пониженными скоростями прохождения упругих волн, залегающий в низах верхней коры, и переходный корово-мантийный слой [21]. В северо-западной части Кольского полуострова нижняя граница верхней коры проводится на глубинах 12–15 км. Ниже, до глубин 20–21 км и 37–38 км, выделены соответственно средняя кора – предположительно диоритового состава, и базитовая нижняя кора, через переходный слой (мощностью около 5 км) граничащая с верхней мантией.

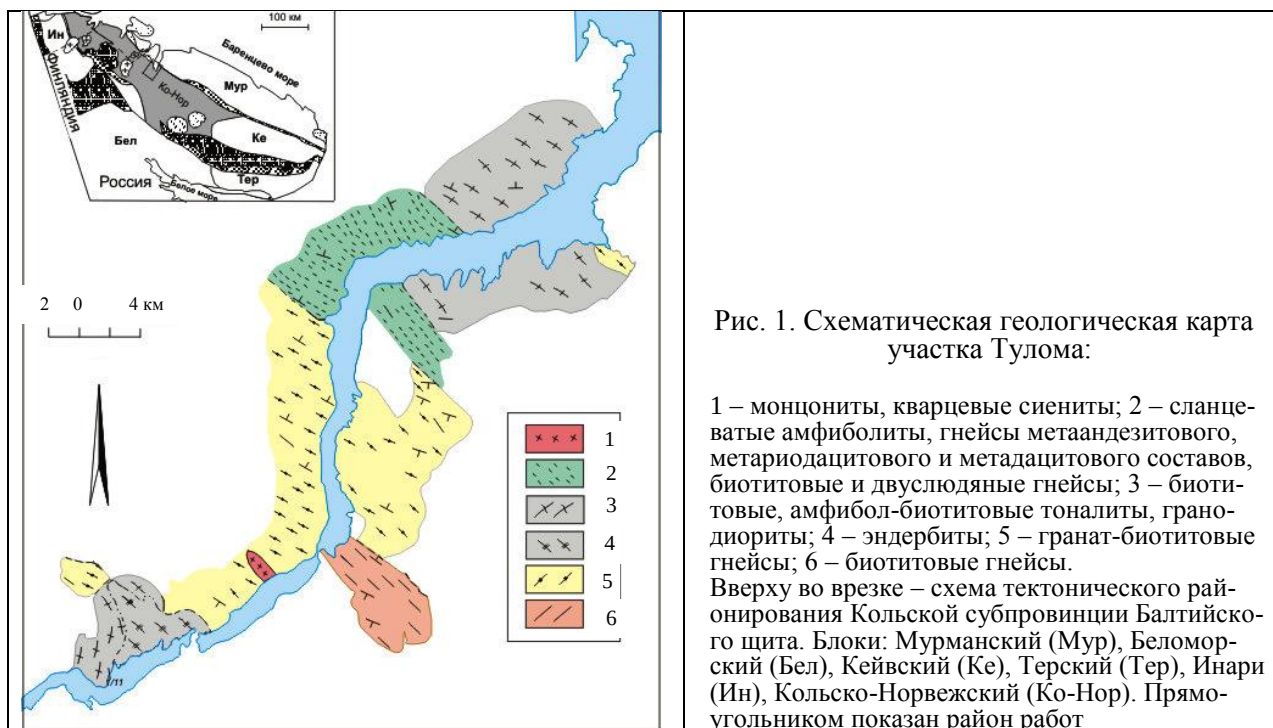
Наиболее глубокий разрез докембрийской верхней коры северной части Балтийского щита вскрыт Кольской сверхглубокой скважиной (СГ-3), пробуренной в северо-западной части Мурманской области. До глубины 6842 м скважина пересекает осадочно-вулканогенный комплекс палеопротерозойской Печенгской рифтогенной структуры, и далее, до забоя на глубине 12 262 м, – мезоархейские породы ее фундамента. Архейский метаморфизм пород происходил в условиях амфиболитовой фации и сопровождался мигматизацией гнейсов с образованием согласно расположенных слоев меланосом и лейкосом, придающих породам типичную мигматитовую текстуру. В палеопротерозойские породы разреза СГ-3 были повторно метаморфизованы (2,1–1,7 млрд лет) в условиях амфиболитовой, эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций.

С севера и востока вмещающими породами для Печенгской структуры являются мезоархейские пара-, ортогнейсы ($T_{Zr}=2,91$ млрд лет [20]) и эндербиты ($T_{Zr}=2,92–2,99$ млрд лет [6]) Кольско-Норвежского блока; с запада и северо-запада – неоархейские тоналит-трондьемитовые комплексы блока Инари и северо-западной части Кольско-Норвежского блока. По результатам глубинного сейсмического зондирования рассматриваемые породы северо-западного обрамления Печенги прослеживаются под этой структурой и образуют существенную часть ее фундамента [24]. Сравнение архейского комплекса СГ-3 с породами окружения скважины по геологии, петрохимии, геохимии редких, в том числе редкоземельных элементов, возрасту и систематике Sm-Nd изотопной системы выявило значительное сходство архейских пород разреза СГ-3 с породами западного и северо-западного обрамления Печенги, аналогами пород архейского комплекса скважины [5, 30]. Гнейсы и эндербиты Кольско-Норвежского блока, с которыми раньше сопоставлялись породы архейского комплекса СГ-3 [18, 19], имеют более раннее время образования, характеризуются неоднократным проявлением процессов метаморфизма гранулитовой и высокотемпературной амфиболитовой фаций; существенно отличаются по составу главных и второстепенных элементов и по изотопным характеристикам от аналогичных пород в разрезе СГ-3 [6].

Целью исследования является определение упругих и неупругих характеристик образцов метаморфических пород центральной части Кольско-Норвежского блока Балтийского щита (рис. 1). Особое внимание предполагается уделить вариациям значений плотности, скоростям распространения продольных и поперечных волн, параметрам упругой анизотропии. Планируется выявить качественные связи результатов акустополаризационных измерений с текстурами образцов, отображенными в плоскости шлифов.

Объекты и методика исследований

В процессе работ были изучены упругие и неупругие свойства 18-ти образцов пород из обнажений районов пос. Тулома, р. Пяйве, оз. Няльярв, обьездной автодороги г. Мурманска, карьеров г. Мурманска, г. Североморска, г. Магнетиты. В указанных районах присутствуют все главные породные разновидности Кольско-Норвежского блока: плагиоамфиболиты; биотитовые, гранат-биотитовые и силлиманит-гранат-биотитовые гнейсы кольской серии; породы основного состава и гранитоиды (лейкограниты, тоналиты, эндербиты). При структурном анализе гнейсов выделены семь этапов складчатых деформаций, объединенные в *два деформационных цикла* [12]. *Ранний* структурно-метаморфический цикл характеризовался условиями высокотемпературной амфиболитовой и гранулитовой фаций пониженных давлений [26] и *поздний* – низкотемпературной амфиболитовой фации. В течение первого цикла гнейсы были смяты в изоклинальные складки (F_1 и F_2) с крутым до вертикального залеганием осевых плоскостей и формированием гранат-биотит-кордиерит-силлиманитового парагенезиса, приуроченного к плоскостям сланцеватости S_1 и S_2 . Минеральные парагенезисы второго



деформационного цикла (биотит, силлиманит, дистен, андалузит, ставролит, железистый гранат) располагаются по плоскостям сланцеватости осевых поверхностей складок F4. Возраст и РТ-условия раннего гранулитового этапа метаморфизма кольских гнейсов в районе оз. Пулозера-Полнек тундры (к югу от изученного участка) составляют $2\,724 \pm 49$ млн лет ($T = 700\text{--}800^\circ\text{C}$; $P = 5,5\text{--}7,5$ кбар); позднего метаморфизма амфиболитовой фации $-2\,568 \pm 10$ млн лет ($T = 580\text{--}640^\circ\text{C}$; $P = 4\text{--}6$ кбар [22]).

После отбора образцов, проведения петрографического изучения и описания, определения минерального состава и его вариаций (табл. 1), были изготовлены образцы в форме куба, размером 2–3 см.

В начале петрофизических определений методом Архимеда измерили объемную плотность образцов (табл. 2). Для диагностики наличия анизотропии, определения количества и направленности элементов упругой симметрии нами применен акустополаризационный метод [9, 10]. Определения анизотропии упругих свойств выполнены на основе последних усовершенствований акустополаризационного метода и соответствующего приборного комплекса [2, 9, 10, 13, 15, 17]. Принципиальная схема наблюдений, осуществляемых по этому методу, не отличается от схемы, применяемой при поляризационных измерениях в оптике [7], и выполняется при помощи прибора акустополарископа [9, 16]. Отличительная особенность нового приборного комплекса состоит в наличии автоматизированного привода поворотной платформы акустополарископа. В процессе измерений происходит передача данных в ПЭВМ в режиме реального времени [13, 17].

Для акустополаризационных определений используются преобразователи, излучающие интенсивные, линейно-поляризованные чистоперечные (сдвиговые) колебания [9]. Измерения осуществляются на частоте ультразвукового диапазона 1,25 МГц. 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).

Результатом измерений являются акустополариграммы ВП и ВС – круговые диаграммы изменения амплитуды огибающей импульса в пределах полного угла поворота образца. Уникальным достоинством акустополаризационного метода является возможность учитывать особенности распространения упругих волн в твердых анизотропных средах и определять по полученным акустополариграммам соответствующие эффек-

**Минеральный состав и структура пород центрального района Кольско-Норвежского блока
(участка Тулома)**

Номер образца	Минеральный состав (объемн. %)	Структура	Название породы
1	2	3	4
TU-11-002-1,2	Pl-45; Qtz-5; KFsp-5; Hbl-44; Ap-0,5; Opq-0,5	Нематобластовая	Fsp-амфиболит
TU-11-004-1,2	Pl-48; Qtz-25; KFsp-5; Hbl-7; Bt-13; Ttn-1; Ep-1, Ap, Opq-ед. зн.	Бластогранитная, порфиробластовая	Hbl-Bt-тоналитовый гнейс
TU-11-005-1,2	Pl-32; Qtz-40; KFsp-15; Bt-10; Ttn-0,5; Opq-2,5; Ap, Aln- ед. зн.	Коррозионно-метасоматическая, бластогранитная	Окварцованный и микроклинизированный тоналитовый гнейс
TU-11-013-1,2	Pl-56; Qtz-32; Bt-7; Opх-5; Zrn-ед.зн.	Гранобластовая, аллотрио-морфнозернистая	Эндербит
TU-11-015-1,2	Pl-50; Qtz-15; Grt-12; Sil-5; Bt-14; Ms-1; Opq-3	Порфирогранобластовая	Sil-Gr-Bt-гнейс
TU-11-028-1,2	Pl-23; Qtz-30; KFsp-37; Sil-5; Bt-2; Grt-3	Поррфировидная	Grt-Sil-Bt-лейкогранит
TU-11-031-1,2	Hbl-83; Cpx-15; Cal-0,5; Opq-1,5	Панидиоморфнозернистая	Пироксеновый амфиболит
TU-11-035-1,2	Pl- 56; Qtz-20; Hbl-12; Bt-3; Opх-8;Opq-1	Гранобластовая	Эндербит
TU-11-039-1,2	Pl-55; Qtz-25; Hbl-7; Bt-6; Opq-5 Ap-2; Zrn-ед.	Бластогранитная	Hbl-Bt-тоналитовый гнейс
TU-11-042-1,2	Pl-47; Qtz-32; Bt-12; Grt-7; Opq-2	Гранобластовая, порфирогранобластовая	Grt-Bt-гнейс
TU-11-043-1,2	Pl-40; Qtz-21; KFsp-10; Bt-14; Grt-12; Sil-3; Ap, Zrn-ед.зн.	Гранобластовая, порфирогранобластовая	Sil-Grt-Bt-гнейс
TU-11-052-1,2	Pl-15; Bt-5; Келифит (ромбический амфибол??)-40; Hbl-35; Opq-5	Келифитовая	Плагеоамфиболит (келифитовое габбро)
TU-11-056-1,2	Pl-35; Qtz-30; Hbl-2; Bt-30; Opq-3	Лепидогранобластовая	Hbl-Bt-гнейс
TU-11-070-1	Pl-40; Qtz-25; Bt-8; Grt-20; Sil-6; Opq-1	Лепидогранобластовая, гранобластовая	Sil-Grt-Bt-гнейс
TU-11-072-1,2	Pl-25; Kfs-15; Qtz-20; Grt-20; Bt-15; Sil-5; Ap, Mag, Zrn - tr (следы)	Порфирогранобластовая	Sil-Gr-Bt-гнейс
TU-11-081-1,2	Pl-40; Hbl-55; Ttn-3; Opq-2	Нематобластовая	Плагеоамфиболит
TU-11-086-1,2	Pl-50; Qtz-35; Bt-12; Opq-3	Лепидогранобластовая	Bt-гнейс
TU-11-094-1,2	Pl-55; Qtz-15; Hbl-12; Bt-15; Ap-2; Opq-1; Zrn-ед. зн.	Бластогранитная	Эндербит измененный (диафторированный)

Примечание: Обозначение минералов дано по Kretz [28].

Таблица 2

Петрофизические свойства образцов центральной части Кольско-Норвежского блока

№ образца	Наименование породы	ρ , г/см ³	V_{ij} , км/с			A_p , %	B_s , %	D_1 , D_2 , D_3
1	2	3	4			5	6	7
TU-11-002	полевошпатовый амфиболит	2,85	5,38 3,61 3,34	3,34 5,88 3,47	3,34 3,50 5,83	6,8	4,8	0,11 0,04 0,11
TU-11-004	роговообманковый тоналитовый гнейс	2,69	4,17 2,74 2,65	2,72 4,72 2,89	2,67 3,00 4,65	9,4	12,5	0,13 0,11 0,15
TU-11-005	окварцованный и микроклинизированный тоналитовый гнейс	2,57	2,38 2,06 2,26	1,82 3,08 2,19	1,80 2,11 3,12	20,5	4,3	0,15 0,16 0,15
TU-11-013	эндербит	2,65	4,85 3,11 3,01	3,10 5,39 3,13	3,09 3,23 4,84	8,9	5,5	0,07 0,24 0,08
TU-11-015	силлиманит-гранат-биотитовый гнейс	2,79	3,77 2,24 2,47	2,48 3,50 2,22	2,54 2,29 3,83	6,8	10,8	0,04 0,28 0,17
TU-11-028	гранат-силлиманит-биотитовый лейкогранит	2,65	4,86 3,03 3,04	3,03 5,02 3,05	3,08 3,15 4,86	2,65	4,0	0,20 0,02 0,06
TU-11-031	пироксеновый амфиболит	3,18	5,68 3,26 3,52	3,22 5,68 3,68	3,53 3,69 6,18	7,0	16,1	0,01 0,03 0,05
TU-11-035	эндербит	2,74	4,91 2,85 2,87	2,94 4,35 2,78	2,91 2,75 4,51	8,9	4,8	0,06 0,12 0,20
TU-11-039	роговообманковый тоналитовый гнейс	2,69	4,61 2,79 2,65	2,81 4,46 2,72	2,74 2,73 4,18	7,0	3,95	0,02 0,08 0,07
TU-11-041	гранат-биотитовый гнейс	2,63	5,06 2,94 3,03	3,03 4,45 2,88	3,19 2,87 4,69	9,2	7,5	0,38 0,14 0,07
TU-11-042	гранат-биотитовый гнейс	2,69	3,46 2,41 2,32	2,31 3,77 2,59	2,46 2,03 3,93	9,1	21	0,24 0,12 0,15
TU-11-043	силлиманит-гранат-биотитовый гнейс	2,58	4,23 2,24 2,41	2,36 3,14 2,14	2,86 2,37 3,89	20,9	23	0,32 0,17 0,30
TU-11-052	плагиоамфиболит (кельфитовое габбро)	3,21	6,55 3,61 3,69	3,56 6,48 3,66	3,69 3,67 6,54	0,8	4,00	0,09 0,01 0,00
TU-11-056	роговообманковый биотитовый гнейс	2,71	4,96 2,91 2,42	3,11 5,41 3,21	3,00 3,18 5,32	6,52	29,8	0,01 0,11 0,06
TU-11-070	силлиманит-гранат-биотитовый гнейс	2,73	3,11 2,57 2,27	2,27 4,04 2,46	2,27 2,49 3,81	18,6	8,6	0,21 0,21 0,06
TU-11-072	силлиманит-гранат-биотитовый гнейс	2,74	3,69 2,45 2,54	2,50 4,35 2,64	2,46 2,79 4,24	12,3	13,7	0,31 0,27 0,12
TU-11-081	плагиоамфиболит	2,94	3,05 1,58 2,80	2,38 2,13 3,08	2,37 1,81 4,53	52,9	16,6	0,89 0,53 0,20
TU-11-086	биотитовый гнейс	2,63	3,37 2,98 2,39	2,35 4,40 2,80	2,37 2,78 4,03	18,8	17,5	0,12 0,10 0,11
TU-11-094	эндербит измененный (диафторированный)	2,70	5,93 3,44 2,83	3,39 6,22 2,91	3,31 3,61 4,93	16,8	6,0	0,24 0,06 0,12

ты или явления, возникающие при их распространении [14]. По акустополяриграммам ВП определяются наличие и степень проявления эффекта линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП) [9]. Акустополяриграммы, полученные в положении ВС, позволяют определить число и направленность проекций элементов упругой симметрии анизотропного образца, выявить наличие явления деполяризации сдвиговых волн (ДСВ) [11].

Степень проявления эффекта ЛААП определяют по формуле:

$$D = \frac{A_{\text{нп}} - A_{\text{нс}}}{A_{\text{нп}} + A_{\text{нс}}} \quad (1)$$

где $A_{\text{нп}}$, $A_{\text{нс}}$ – амплитуды наибольшего и наименьшего пропускания колебаний (наибольший и наименьший диаметры акустополяриграммы ВП).

На последующих этапах измеряют скорости распространения продольных и поперечных упругих колебаний, производят вычисление коэффициентов и показателей анизотропии, определение типа упругой симметрии породы. Результаты измерений скоростей распространения продольных (VP), поперечных (VS) по всем граням кубических образцов представлены в виде квази-матрицы (табл. 2, [10]).

$$\begin{array}{ccc} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} \end{array} \quad (2)$$

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

Для оценки степени анизотропии образца в целом по значениям скорости продольных колебаний применяют формулу для расчета обобщенного коэффициента анизотропии [10]:

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

где $V_{\text{ср}} = \frac{V_{11} + V_{22} + V_{33}}{3}$ – значение средней скорости распространения продольных колебаний в анизотропном образце.

Для оценки степени анизотропии образца по скорости поперечных колебаний рассчитывают обобщенный показатель анизотропии B_s . Значение B_s вычисляли по формулам работы [10].

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

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 двулучепреломления поперечных волн, определенных соответственно для направлений 1-1', 2-2', 3-3'. Наиболее подробно методика проведения определений описана в работах [9, 15].

Результаты определений

Фотографии шлифов пород центральной части Кольско-Норвежского блока приведены на рис. 2; акустополяриграммы образцов пород – на рис. 3. В табл. 2 приведены номера образцов, их наименование, плотность (ρ), квазиматрицы значений скорости распространения продольных и поперечных колебаний (V_{ij}), коэффициенты (A_p) и показатели (B_s) упругой анизотропии. В таблице также находятся показатели степени проявления линейной акустической анизотропии поглощения (D_1, D_2, D_3), рассчитанные для 1, 2 и 3-й граней образца.



Рис. 2. Микрофотографии шлифов пород центральной части Кольско-Норвежского блока (участок Тулома):

1 – TU-11-002; 2 – TU-11-005; 3 – TU-11-015; 4 – TU-11-031; 5 – TU-11-039; 6 – TU-11-042; 7 – TU-11-052; 8 – TU-11-081

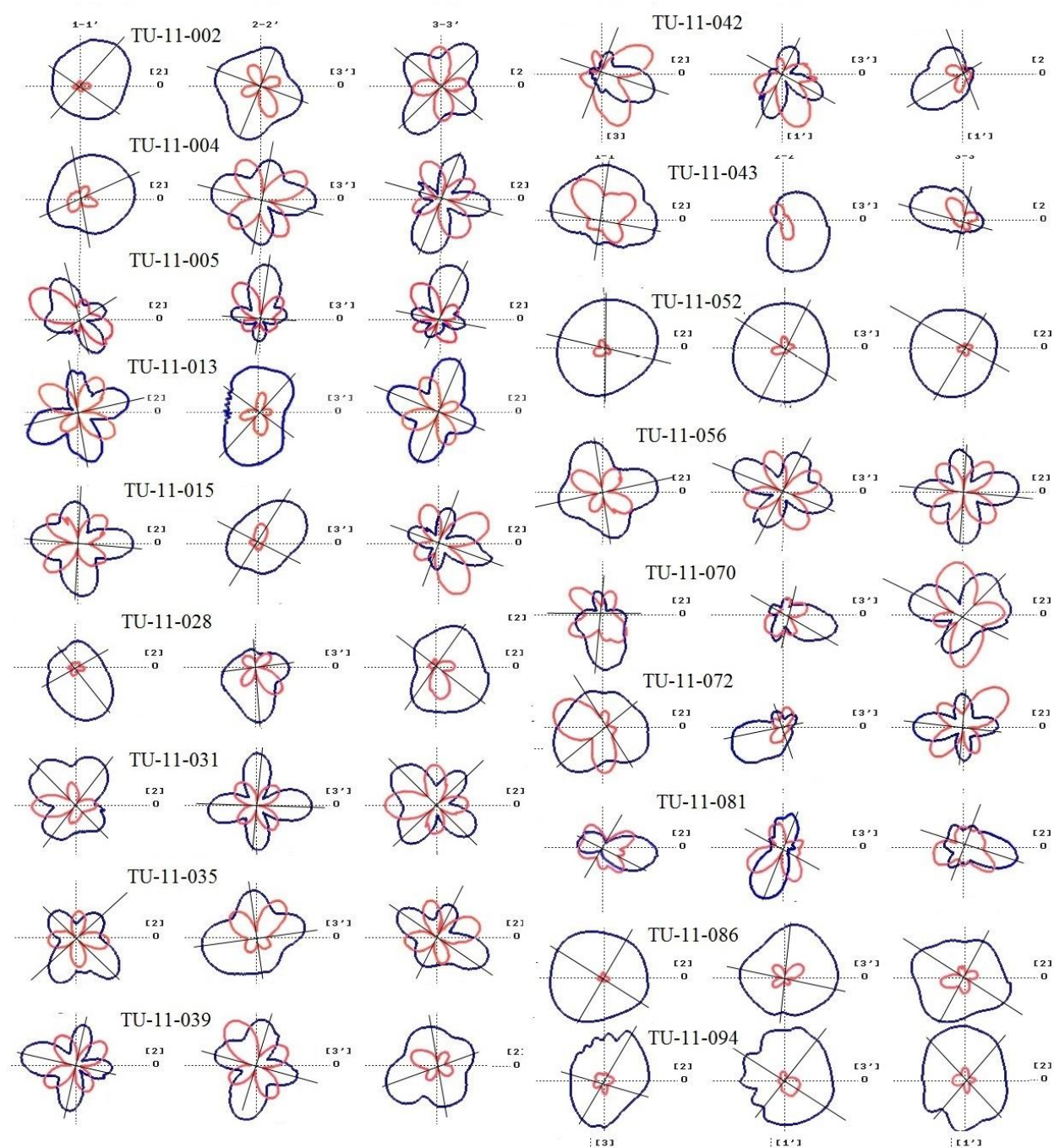


Рис. 3. Акустополяриграммы образцов пород центральной части Кольско-Норвежского блока

Образцы: TU-11-002 – полевошпатовый амфиболит; TU-11-004 – роговообманково-биотитовый тоналитовый гнейс; TU-11-005 – окварцованный микроклинизированный тоналитовый гнейс; TU-11-013, TU-11-035 – эндербит; TU-11-039 – роговообманковый тоналитовый гнейс; TU-11-015, TU-11-043, TU-11-070, TU-11-072 – силлиманит-гранат-биотитовый гнейс; TU-11-042 – гранат-биотитовый гнейс; TU-11-028 – гранат-силлиманит-биотитовый лейкогранит; TU-11-031 – пироксеновый амфиболит; TU-11-056 – роговообманковый биотитовый гнейс; TU-11-086 – биотитовый гнейс; TU-11-052, TU-11-081 – плагиоамфиболит; TU-11-094 – эндербит измененный.

Темная линия – векторы параллельны (ВП); светлая – скрещены (ВС)

Анализ акустополяриграмм ВП и ВС показывает, что у большей части образцов (см. рис. 3) наблюдаются симметричные четырехлепестковые фигуры, что означает наличие в породах упругой анизотропии. На большинстве акустополяриграмм ВС можно провести прямые линии, соединяющие минимумы амплитуды проходящего через образец сигнала, и тем самым определить пространственное положение проекций элементов упругой симметрии. Три проекции по трем парам граней образца позволяют определить пространственное положение элементов симметрии [9]. Наблюдаемое отличие форм диаграмм (см. рис. 3) от теоретических обусловлено наличием структурных неоднородностей в строении пород.

Сравнение акустополяриграмм с текстурой, отображенной в плоскости шлифов, (см. рис. 2), позволяет заметить, что директивность в очертании минеральных зерен сопровождается признаками наличия анизотропии в акустополяриграммах ВП и ВС (см. рис. 3, шлифы TU-11-002, TU-11-005, TU-11-015, TU-11-031). Хаотичное распределение очертаний минеральных зерен, наличие скоплений очень мелких зерен в образце TU-11-052 плагиоамфиболита (келифитового габбро) отразилось в акустополяриграммах ВП и ВС. Их очертания очень близки к формам изотропного образца [9]. Явно выраженная ориентация зерен продолговатой формы в образце TU-11-081 плагиоамфиболита привела к проявлению двух ярко выраженных эффектов в формах акустополяриграмм – анизотропии и эффекта акустической анизотропии поглощения.

Акустополяриграммы ВП некоторых других образцов имеют отчетливо уплощенные очертания. Это свидетельствует о довольно частом проявлении эффекта ЛААП. Максимальное проявление ЛААП наблюдается в образце плагиоамфиболита (обр. TU-11-081, ось 1-1', $D_1 = 0,89$; ось 2-2', $D_2 = 0,53$; ось 3-3', $D_3 = 0,20$). Средняя степень ЛААП ($D > 0,2$) проявляется в образцах тоналита (обр. TU-11-034b, ось 1-1', $D_1 = 0,44$; ось 2-2', $D_2 = 0,22$); гранат-биотитового гнейса (обр. TU-11-041, ось 1-1', $D_1 = 0,38$; ось 2-2', $D_2 = 0,14$); силлиманит-гранат-биотитового гнейса (обр. TU-11-043, TU-11-065, TU-11-072) и в образце пироксенового амфиболита (обр. TU-11-098, ось 2-2', $D_2 = 0,18$; ось 3-3', $D_3 = 0,29$). Образец эндербита характеризуется различной степенью проявления ЛААП (обр. TU-11-035, ось 1-1', $D_1 = 0,06$; ось 2-2', $D_2 = 0,22$; ось 3-3', $D_3 = 0,2$). В остальных образцах эффект существенно не проявляется ($D < 0,1$). Более ранними исследованиями показано, что этот эффект, как правило, возникает при наличии ориентированной микротрещиноватости и преимущественной ориентировки удлиненных зерен минералов [10].

На акустополяриграммах некоторых образцов (обр. TU-11-005, TU-11-013, TU-11-015, TU-11-021, TU-11-041, TU-11-031, TU-11-039, TU-11-056, TU-11-081 оси 1-1', 3-3') наблюдается отклонение направления наибольшего пропускания ЛААП от ориентации проекций элементов упругой симметрии – так называемое явление углового несогласия (УНС). Чаще всего такое рассогласование встречается, когда преимущественное направление микротрещин не совпадает с преобладающей ориентацией кристаллоупругих осей минеральных зерен. Наиболее характерный пример проявления УНС по всем трем граням зафиксирован в образцах гранат-биотитового гнейса (обр. TU-11-041), силлиманит-гранат-биотитового гнейса (обр. TU-11-070). В этом образце преимущественное направление микротрещин образует некоторый угол с преобладающей ориентацией элементов кристаллоакустической симметрии.

Акустополяриграммы некоторых образцов характеризуются аномально большими округленной формы диаграммами ВС. Как показано ранее [11], такие формы акустополяриграмм наблюдаются при условии, когда, в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, кристаллоакустические оси минеральных зерен распределены в широком диапазоне углов. Максимальная амплитуда диаграмм ВС при этом может превзойти амплитуду ВП. В этом случае наблюдается эффект деполаризации сдвиговых волн (ДСВ). Существенно проявление этого эффекта в образце силлиманит-гранат-биотитового гнейса (обр. TU-11-043, грань 1-1') и объясняется наибольшим числом разнородных минералов в составе породы. В отчетливой форме эффект ДСВ наблюдается в образцах TU-11-005, TU-11-031, TU-11-035, TU-11-070, TU-11-081.

На форму акустополяриграмм образцов также влияют неоднородности и разноориентированная микротрещиноватость. Несимметричная угловатая форма акустополяриграмм ВП образцов TU-11-042, TU-11-043, TU-11-070, TU-11-072, TU-11-081 свидетельствует о существенном влиянии этих факторов на их упругие свойства. Наименьшее влияние неоднородностей наблюдается в образцах гранат-силлиманит-биотитового лейко-гранита (обр. TU-11-028), плагиоамфиболита (обр. TU-11-052) и биотитового гнейса (обр. TU-11-086).

Возможное влияние минерального состава на ЛААП не выявляется (см. табл. 1; 2; рис. 3). В целом сравнение очертаний акустополяриграмм показывает, что их форма не позволяет отличить породы разного минерального состава, например, эндербиты от плагиоамфиболитов или биотитовых гнейсов. Таким образом, форма акустополяриграмм определяется не их минеральным составом, а структурно-текстурными особенностями пород, определявшимися, в свою очередь, конкретными палеогеодинамическими условиями, сформировавшими ту или иную текстуру и неоднородность конкретного образца. Упругоанизотропный облик породы складывается из локальных соотношений в поле палеонапряжений, которые существовали в данном конкретном месте [10].

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 в образцах плагиоамфиболита, обр. TU-11-052 (средняя скорость распространения продольных волн $V_{\text{рп}} = 6,52$ км/с, поперечных $V_{\text{ср}} = 3,65$ км/с) и окварцованного микроклинизированного тоналитового гнейса, обр. TU-11-005 ($V_{\text{рп}} = 2,86$ км/с, $V_{\text{ср}} = 2,0$ км/с). Образцы пород, отобранные с земной поверхности, подвергаются процессам выветривания, тем не менее, в целом, образцы, содержащие больший процент слюды, обладают меньшими значениями скоростей. Образцы с большей плотностью показывают большие средние скорости продольных и поперечных волн. Соответственно, это происходит из-за большего содержания амфибола.

Для определения типа упругой симметрии образцов, совместно с анализом полученных акустополяриграмм (см. рис. 2), проведен анализ скоростных соотношений (СС) в квазиматрицах V_{ij} , табл. 3 [15]. В некоторых образцах отмечаются различия в скорости распространения продольных волн следующих типов: $V_{11} > V_{33} > V_{22}$ (обр. TU-11-043); $V_{33} > V_{22} > V_{11}$ (обр. TU-11-042); $V_{22} > V_{33} > V_{11}$ (обр. TU-11-070). Эту группу образцов можно отнести к орторомбическому типу симметрии. Такой тип симметрии характеризуется, по меньшей мере, двумя взаимно ортогональными плоскостями симметрии [1, 23]. В изучаемых породах такую структуру можно представить моделью в виде двух взаимно перпендикулярных систем плоскопараллельных слоев, каждый из которых может быть образован системами листовых или цепочечных силикатов (биотит, роговая обманка и др.). Строгое соответствие орторомбической симметрии могло быть зафиксировано, если бы в матрице V_{ij} наблюдалось, например, соотношение для скоростей продольных и поперечных волн:

$$V_{11} > V_{22} > V_{33}; (V_{12} = V_{21}) > (V_{13} = V_{31}) > (V_{23} = V_{32}). \quad (5)$$

В образце плагиоамфиболита (келифитового габбро) TU-11-052 наблюдается редкое соотношение скоростей в матрице V_{ij} : $V_{11} = V_{33} = V_{22}$, $V_{13} = V_{31} = V_{23} = V_{32} = V_{21} \approx V_{12}$. Подобные соотношения достаточно редко имеют место в полиминеральных средах и характеризуют изотропные свойства породы. Акустополяриграмма образца TU-11-052 показывает практическое полное отсутствие проекций элементов симметрии на всех трех гранях. Поэтому данный образец можно отнести к изотропным.

Другая группа образцов имеет иные соотношения в матрице V_{ij} (см. табл. 3), например $V_{22} = V_{33} > V_{11}$ (обр. TU-11-002); и др. Такие соотношения могут свидетельствовать о близости к поперечно-изотропному типу симметрии данных образцов. Однако акустополяриграммы ряда образцов TU-11-039, TU-11-056, TU-11-072, TU-11-081 показывают наличие проекций элементов симметрии на всех трех гранях и, соответственно, при более строгом подходе их следует отнести к орторомбическому типу симметрии. Отсюда следует, что акустополярископия является тонким инструментом, позволяющим более точно определить, к какому типу симметрии относится порода. В итоге только четыре образца (обр. TU-11-002, TU-11-004, TU-11-015, TU-11-028) можно отнести к поперечно-изотропному типу упругой симметрии. Конечно, упругую анизотропию кристаллических пород нельзя соотносить с кристаллами, имеющими тот или иной определенный тип симметрии. Эти типы симметрий можно называть только квазисимметриями. Приведенные данные позволяют судить о том или ином распределении палеонапряжений, сформировавших упругую анизотропию данной породы [10].

Полученные величины A_p и B_s (см. табл. 2) в целом позволяют заключить, что образцы пород центрального района Кольско-Норвежского блока являются как слабо, так и сильноанизотропными. Показатели анизотропии, определенные по продольным волнам, изменяются в пределах $A_p = 0,8\text{--}53\%$, по поперечным $B_s = 3,95\text{--}29,8\%$. В целом, наибольшими значениями показателей A_p и B_s обладают биотитовые гнейсы, меньшими – эндербиты. Следует отметить, что в архейской части разреза СГ-3 полученные значения A_p и B_s образцов находятся в более узком диапазоне изменений [25].

Выводы

Исследованы главные породные разновидности центральной части Кольско-Норвежского блока: плагиоамфиболиты; биотитовые, гранат-биотитовые и силлиманит-гранат-биотитовые гнейсы кольской серии; породы основного состава и гранитоиды (лейкограниты, тоналиты, эндербиты). Сравнение акустополяриграмм со структурными элементами, отображенными в плоскости шлифов, позволило отметить, что директивность в

**Скоростные соотношения и тип упругой симметрии образцов центрального района
Кольско-Норвежского блока**

№ образца	Скоростные соотношения	Тип симметрии
TU-11-002	$V_{22}=V_{33}>V_{11}$ $V_{21}\sim V_{23}=V_{32}>V_{31}=V_{12}=V_{13}$ $(V_{21}>V_{12})\sim(V_{23}=V_{32})>(V_{31}=V_{13})$	поперечно-изотропный
TU-11-004	$V_{22}=V_{33}>V_{11}$ $V_{23}>V_{32}>V_{21}=V_{12}\sim V_{13}=V_{31}$ $(V_{23}>V_{32})>(V_{21}=V_{12})\sim(V_{13}=V_{31})$	поперечно-изотропный
TU-11-005	$V_{33}\sim V_{22}>V_{11}$ $V_{31}>V_{32}>V_{23}>V_{21}>V_{12}\sim V_{13}$ $(V_{31}>V_{13})>(V_{32}>V_{23})>(V_{21}>V_{12})$	орторомбический
TU-11-013	$V_{22}>V_{11}=V_{33}$ $V_{23}>V_{32}=V_{21}=V_{12}=V_{13}\sim V_{31}$ $(V_{23}>V_{32})>(V_{21}=V_{12})=(V_{13}\sim V_{31})$	орторомбический
TU-11-015	$V_{33}=V_{11}>V_{22}$ $V_{13}>V_{12}=V_{31}>V_{23}\sim V_{21}=V_{32}$ $(V_{13}>V_{31})>(V_{12}>V_{21})>(V_{23}\sim V_{32})$	поперечно-изотропный
TU-11-028	$V_{22}\sim V_{11}=V_{33}$ $V_{23}\sim V_{13}=V_{32}=V_{31}=V_{12}=V_{21}$ $(V_{23}\sim V_{32})\sim(V_{13}=V_{31})=(V_{12}=V_{21})$	поперечно-изотропный
TU-11-031	$V_{33}>V_{22}=V_{11}$ $V_{32}=V_{23}>V_{13}=V_{31}>V_{21}=V_{12}$ $(V_{32}=V_{23})>(V_{13}=V_{31})>(V_{21}=V_{12})$	орторомбический
TU-11-035	$V_{11}>V_{33}>V_{22}$ $V_{12}=V_{13}\sim V_{31}=V_{21}>V_{32}=V_{23}$ $(V_{12}\sim V_{21})=(V_{13}\sim V_{31})>(V_{32}=V_{23})$	орторомбический
TU-11-039	$V_{11}\sim V_{22}>V_{33}$ $V_{12}=V_{21}\sim V_{13}=V_{23}=V_{32}>V_{31}$ $(V_{12}=V_{21})\sim(V_{13}>V_{31})=(V_{23}=V_{32})$	орторомбический
TU-11-042	$V_{33}>V_{22}>V_{11}$ $V_{32}>V_{13}\sim V_{21}>V_{31}=V_{12}>V_{23}$ $(V_{32}>V_{23})>(V_{13}>V_{31})\sim(V_{21}>V_{12})$	орторомбический
TU-11-043	$V_{11}>V_{33}>V_{22}$ $V_{13}>V_{31}\sim V_{23}=V_{12}>V_{21}>V_{32}$ $(V_{13}>V_{31})\sim(V_{23}>V_{32})=(V_{12}>V_{21})$	орторомбический
TU-11-052	$V_{11}=V_{33}=V_{22}$ $V_{13}=V_{31}=V_{23}=V_{32}=V_{21}\sim V_{12}$ $(V_{13}=V_{31})=(V_{23}=V_{32})=(V_{21}\sim V_{12})$	орторомбический
TU-11-056	$V_{22}=V_{33}>V_{11}$ $V_{32}=V_{23}\sim V_{12}>V_{13}>V_{21}>V_{31}$ $(V_{32}=V_{23})\sim(V_{12}>V_{21})>(V_{13}>V_{31})$	изотропный
TU-11-070	$V_{22}>V_{33}>V_{11}$ $V_{21}>V_{23}=V_{32}>V_{31}=V_{13}=V_{12}$ $(V_{21}>V_{12})>(V_{23}=V_{32})>(V_{31}=V_{13})$	орторомбический
TU-11-070	$V_{22}>V_{33}>V_{11}$ $V_{21}>V_{23}=V_{32}>V_{31}=V_{13}=V_{12}$ $(V_{21}>V_{12})>(V_{23}=V_{32})>(V_{31}=V_{13})$	орторомбический
TU-11-072	$V_{22}\sim V_{33}>V_{11}$ $V_{23}>V_{32}>V_{31}\sim V_{12}\sim V_{13}=V_{21}$ $(V_{23}>V_{32})>(V_{31}\sim V_{13})\sim(V_{12}\sim V_{21})$	орторомбический
TU-11-081	$V_{33}>V_{11}=V_{22}$ $V_{32}>V_{31}=V_{12}>V_{13}>V_{23}>V_{21}$ $(V_{32}>V_{23})>(V_{31}>V_{13})=(V_{12}>V_{21})$	орторомбический
TU-11-086	$V_{11}<V_{33}>V_{22}$ $V_{13}>V_{12}=V_{21}=V_{32}=V_{31}=V_{23}$ $(V_{13}>V_{31})>(V_{12}=V_{21})=(V_{32}=V_{23})$	орторомбический
TU-11-094	$V_{22}>V_{11}>V_{33}$ $V_{23}>V_{21}\sim V_{12}\sim V_{13}>V_{32}>V_{31}$ $(V_{23}>V_{32})>(V_{21}\sim V_{12})\sim(V_{13}>V_{31})$	орторомбический

очертании минеральных зерен сопровождается признаками наличия анизотропии в акустополариграммах ВП и ВС. Результаты акустополарископии пород показали довольно частое проявление эффектов линейной акустической анизотропии поглощения и деполаризации сдвиговых волн. На форму акустополариграмм образцов также влияют неоднородности и разноориентированная микротрещиноватость.

Образцы с большей плотностью показывают большие средние скорости продольных и поперечных волн. Плотность пород изменяется в пределах $2,57\text{--}3,21\text{ г/см}^3$. Значения скорости распространения продольных волн варьируют в пределах от 2,86 км/с (плаггиоамфиболит) до 6,52 км/с (окварцованный тоналитовый гнейс). Для тех же образцов изменения скорости поперечных волн составляют 2,0–3,65 км/с. Соотношения отдельных значений в квазиматрицах скоростей выявили наличие изотропной, поперечноизотропной и ортотропной квазисимметрий в протестированных образцах.

Породы проявляют заметную упругую анизотропию, которая имеет значительные вариации. Например, изменения коэффициента анизотропии A_p составляют (0,8–53) %, показателя анизотропии B_s (4–30) %. В целом, изменчивость петрофизических свойств пород центрального района Кольско-Норвежского блока очень значительна, что указывает на сложную палеогеодинамическую обстановку этого участка.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №13-05-00125-а, 16-05-00026-а.

Список литературы

1. Александров К.С., Продайвода Г.Т. Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. – Новосибирск: СО РАН, 2000. – 354 с.
2. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс Acoustpol (АПАКА) для оценки качества материалов и объектов из природного камня // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2012. №4. С. 10.
3. Беликов Б.П., Александров К.С., Рыжова Т.В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. – М.: Наука. 1970. – 276 с.
4. Белоусов В. В. Земная кора и верхняя мантия материков. – М.: Наука. 1966. – 123 с.
5. Ветрин В.Р., Ковалевский М.В., Серов П.А. Геохимические и изотопно-геохимические критерии корреляции архейского комплекса Кольской сверхглубокой скважины СГ-3 с породами окружения. Геология и полезные ископаемые Кольского региона / Труды X Всероссийской (с международным участием) Ферсмановской научной сессии, посвященной 150-летию со дня рождения акад. В.И. Вернадского. – Апатиты: Изд-во К&М. 2013. С. 51–55.
6. Ветрин В.Р., Родионов Н.В., Серов П.А. Возраст, Sm-Nd систематика и геохимия тоналит-трондьемит-гранодиоритовых гнейсов северной части Балтийского щита // Доклады РАН. 2013. Т. 452. № 2. С. 190–195.
7. Волкова Е.А. Поляризационные измерения. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 156 с.
8. Глебовицкий В.А. Ранний докембрий Балтийского щита. – М.: Наука, 2005. – 711 с.
9. Горбачевич Ф.Ф. Акустополарископия горных пород. – Апатиты: КНЦ РАН, 1995. – 203 с.
10. Горбачевич Ф.Ф. Акустополарископия породообразующих минералов и кристаллических пород. – Апатиты: КНЦ РАН, 2002. – 140 с.
11. Горбачевич Ф.Ф. Явление деполаризации сдвиговых волн в анизотропных гетерогенных средах // Физика Земли. 1998. № 6. С. 83–90.
12. Добржинская Л.Ф. Структурно-метаморфическая эволюция кольской серии (Балтийский щит). – М.: Наука. 1978.
13. Ковалевский М.В. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс Acoustpol – новшество или инновация? // Тигетта. – Апатиты: КНЦ РАН, 2010. № 3. С. 42–45.
14. Ковалевский М.В. Акустополаризационные эффекты горных пород Кольско-Норвежского блока Балтийского щита // Физическая акустика. Нелинейная акустика. Распространение и дифракция волн. Аку-

стоэлектроника. Геологическая акустика. Сборник трудов XXV сессии Российского акустического общества. Т. 1. – М.: ГЕОС, 2012. С. 360–364.

15. Ковалевский М.В. Методика определения скоростных соотношений упругих волн в задачах акустополарископии // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Материалы 16-й научной конференции. – Сыктывкар: Геопринт, 2007. С. 69–72.

16. Ковалевский М.В., Головатая О.С., Горбачев Ф.Ф. Автоматический акустополарископ для измерения упругих и неупругих параметров твердых сред // Сборник трудов XI сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2001. Т. 2. С. 117–121.

17. Ковалевский М.В. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс Acoustpol / Учеб. пособие. – Апатиты: Изд-во ООО «К & М», 2009. – 54 с.

18. Кольская сверхглубокая. – М.: Недра, 1984.

19. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований / Под ред. В.П. Орлова, Н.П. Лаверова. – М.: МФ «Технонефтегаз». 1998. – 260 с.

20. Мысцова Т.А., Бережная Н.Г., Глебовицкий В.А. и др. Находки древнейших цирконов с возрастом 3600 млн лет в гнейсах кольской серии Центрально-Кольского блока Балтийского щита (U-Pb, SHRIMP-II) // Доклады АН. 2005. Т. 402. № 1. С. 82–86.

21. Павленкова Н.П. Структура литосферы Балтийского щита по данным ГСЗ // Строение и геодинамика литосферы Восточной Европы. – М.: ГЕОКАРТ-ГЕОС. 2006. С. 33–58.

22. Петровская Л.С., Митрофанов Ф.П., Баянова Т.Б. и др. Этапы и условия формирования архейского эндебит-гранулитового комплекса района Пулозеро-Полнек-тундра Центрально-Кольского блока (Кольский полуостров) // ДАН. 2007. Т. 416. № 3. С. 370–373.

23. Продайвода Г.Т. Принципы симметрии в петрофизике // Геологический журнал. 1978, Т. 38, № 4. С. 61–69.

24. Сейсмогеологическая модель литосферы Северной Европы: Баренц-регион. Часть I. – Апатиты: КНЦ РАН, 1998. – 237 с.

25. Строение литосферы российской части Баренц-региона / Под ред. Н.В. Шарова, Ф.П. Митрофанова, М.Л. Вербы, К. Гиллена. – Петрозаводск: КНЦ РАН. 2005. – 318 с.

26. Фации регионального метаморфизма Кольского полуострова. – Л: Наука. 1977. – 88 с.

27. Christensen, N. and Mooney, W. (1995). Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view / Journal of Geophysical Research 100 (B6): doi: 10.1029/95JB00259.

28. Kretz, R. 1983. Symbols for rock-forming minerals. Amer. Mineral. 68, 277–279.

29. Rudnick, R.L. and Fountain, D.M. (1995) Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. Rev. Geophysics 33: 267–309.

30. Vetrin V.R., Turkina O.M., and Nordgulen III. Surface analogues of «Grey Gneiss» among the Archaean rocks in the Kola Superdeep Borehole. – Apatity: KSC RAS. 1999. – 82 p.