

Список литературы

- Белицкий И. А., Юсупов Т. С., Фелизова Л. И. Выделение мономинеральных фракций некоторых природных цеолитов // Геология и геофизика. 1973. № 7. С. 107—110.
- Кац М. Я., Долгопольская Е. Ф. Количественный анализ гетерогенности минералов с размером зерен 5—50 мкм методом ступенчатого изменения плотности // Литология и полезные ископаемые. 1979. № 6. С. 144—150.
- Сереткин Ю. В., Павлюченко В. С. Особенности РФА-диагностики цеолитсодержащих пород // Природные цеолиты России. Новосибирск: Изд. СО РАН, 1992. С. 56—59.
- Соколова Т. Н., Кац М. Я., Долгопольская Е. Ф. Минералогическое изучение пеплового туфа из соленосной толщи купола индер // Литология и полезные ископаемые. 1978. № 1.
- Юсупов Т. С., Королева С. М., Шумская Л. Г., Ковалева Л. Т. Исследование процесса разделения минералов цеолитсодержащих пород в органических жидкостях // Природные цеолиты России. Новосибирск: Изд. СО РАН, 1992. С. 72—75.
- Юсупов Т. С. Способы концентрирования и выделения цеолитов из горных пород // Методы диагностики и количественного определения содержания цеолитов в горных породах. Новосибирск, 1985. С. 161—168.

Поступила в редакцию
30 июня 1998 г.

УДК 552.153 + 534.2

ЗВМО, № 4, 1999 г.
Proc. RMS, N 4, 1999

© Д. чл. Ф. Ф. ГОРБАЦЕВИЧ,* В. Л. ИЛЬЧЕНКО,* М. В. КОВАЛЕВСКИЙ,**
д. чл. А. К. ШПАЧЕНКО*

АКУСТОПОЛЯРИСКОПИЯ НЕКОТОРЫХ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ

F. F. GORBATSEVICH, V. L. ILCHENKO, M. V. KOVALEVSKY, A. K. SHPACHENKO.
ACOUSTOPOLARISCOPY OF SOME ROCK-FORMING MINERALS

* Геологический институт Кольского научного центра РАН,
184200, Апатиты, ул. Ферсмана, 14

** Санкт-Петербургский электротехнический университет,
197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

Elastic properties of rock-forming minerals have a great influence on processes in the Earth's crust. Opportunities of practical determination of the anisotropic media's characteristics could be substantially extended by the development of the acoustopolariscopic method and the device designed for acoustopolarization measurements — acoustopolariscope. The order of observations is similar to the one generally used for polarization optical measurements of minerals and rocks. The acoustopolariscopy had been carried out for samples of quartz, apatite and microcline. One of the new results consists in revealing in microcline of an effect of linear acoustis anisotropic absorption (LAAA). The LAAA effect is an analogue of optical dichroism (pleochroism). For the first time this effect had been revealed in rocks of the lower part of the Kola super-deep bore-hole. Here, its manifestation has been detected in more than 90 % of the whole amount of samples from the depth interval 4.5—12.06 km.

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

Исследование закономерностей формирования упругоанизотропных свойств минералов и минеральных образований, а также неупругих эффектов, присущим им, представляет собой фундаментальную научную проблему. Эта проблема, в числе прочего, связана с проблемой термодинамического равновесия минерального зерна в парагенетическом ансамбле других зерен кристаллической горной породы в процессе метаморфических преобразований. Например, существующий метод динамического анализа направленности стресса

(компонент поля палеонапряжений) при метаморфических процессах основывается на изучении ориентированного расположения кристаллографических, а чаще оптических осей в минералах. Такова суть микроструктурного метода. На основе этого и других методов в течение последнего времени установлено, что на ориентировку кристаллографических осей минеральных зерен наибольшее влияние оказывают их упругоанизотропные свойства (Вгасе, 1960; Кожевников, 1982). Их ориентировка подчиняется также принципу минимума свободной энергии, который является следствием теоремы об изменении термодинамического потенциала анизотропного тела в поле механических напряжений. Применительно к минеральным зернам полиминеральной породы он формулируется следующим образом: в сильнодеформированных породах в направлении наибольшей компоненты поля палеонапряжения оказывается направление, в котором величина константы податливости минерала максимальна (Делицын, 1985).

Имеются минералы, для которых направленность осей кристаллографической и упругой симметрий очень близка или совпадает. Имеются другие минералы (кварц, кальцит, диопсид, амфибол, плагиоклаз и др.), направленность кристаллографических осей в которых может значительно расходиться с направлением осей упругой симметрии и соответственно с пространственным положением наибольшей (наименьшей) величины модуля упругости (Казаков, 1987). Исходя из этого метод динамического анализа является опосредованным: вначале определяется направленность оптических и кристаллографических осей, а затем с учетом углов расхождения между элементами кристаллографической и упругой симметрий делается заключение о направленности и условиях действия палеонапряжений. Однако в настоящее время сведений о направленности осей упругости, пространственного положения наибольших (наименьших) величин модуля упругости для большого числа породообразующих минералов явно недостаточно. Поэтому нами была выполнена акустополарископия некоторых широко распространенных породообразующих минералов. Ниже приводятся некоторые первичные результаты этой работы.

Вначале был произведен отбор образцов породообразующих минералов соответствующего размера (не менее $10 \times 10 \times 10$ мм) и качества (отсутствие трещин, высокая однородность). Образцы изготавливались в форме куба. Методом Архимеда определена их плотность ρ . Метод акустополарископии является аналогом оптического поляризационного метода, но с использованием сдвиговых ультразвуковых колебаний. Для измерений используется акустополарископ (Горбачевич, 1995). В конструкции акустополарископа имеется поворотная платформа, на которой при помощи держателей закрепляется образец (рис. 1). Прибор также содержит излучатель и приемник часто поперечных линейно-поляризованных ультразвуковых колебаний, гониометр и указатель угла поворота платформы.

Перед измерениями образец устанавливается на поворотную платформу и фиксируется держателями между излучателем и приемником колебаний. На рабочие поверхности этих преобразователей наносится контактная среда, хорошо проводящая сдвиговые колебания. В процессе измерений платформа поворачивается с шагом 1, 5 или 10 градусов в пределах полного угла поворота 360° . В точках наблюдений, на экране ультразвукового прибора фиксируется амплитуда огибающей импульса проходящих колебаний. На первом этапе измерения проводятся при параллельных векторах поляризации излучателя и приемника колебаний (положение ВП). На втором этапе векторы поляризации преобразователей устанавливаются под прямым углом (положение ВС). Измерения выполняются на всех трех парах граней кубического образца. Затем строят акустополариграммы ВП и ВС — круговые диаграммы изменения амплитуды проходящего через образец импульса сдвиговых колебаний в пределах полного угла поворота поворотной платформы. По акустополариграммам ВП определяются наличие и степень проявления эффекта линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП), широко проявляющегося в метаморфических породах (Горбачевич, 1990). Акустополариграммы, полученные в положении ВС, позволяют определить число и направленность проекций элементов упругой симметрии анизотропного образца. Анализ этих проекций, полученных на трех парах граней образца, позволяет определить пространственную направленность элементов упругой симметрии относительно, например, кристаллографических осей. В соответствии с изложенным методом нами выполнена акустополарископия образцов синтетического кварца, природных кристаллов апатита и микроклина (рис. 2).

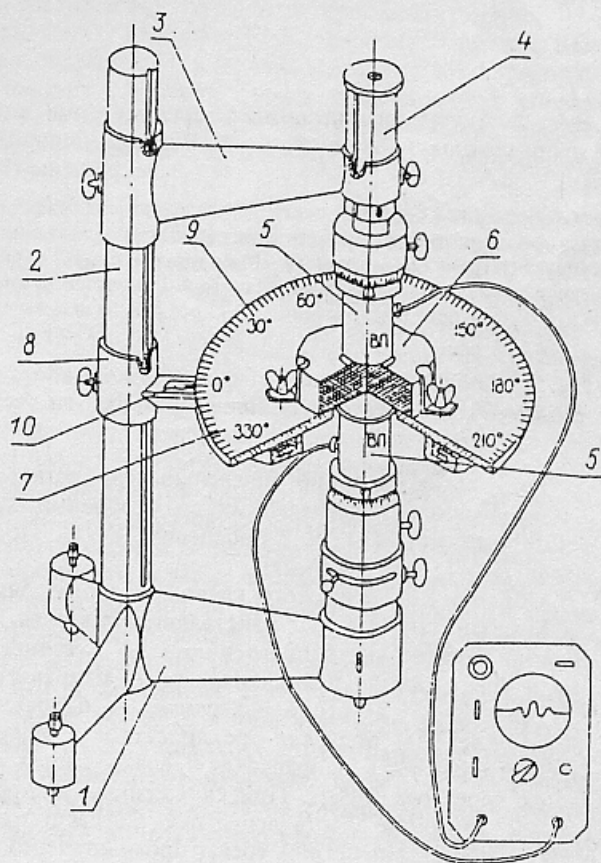


Рис. 1. Конструкция акустополарископа с поворотной платформой (Авт. свид. № 1281993, СССР).

1 — основание, 2 — стойка, 3 — кронштейн, 4 — передвижной шток, 5 — преобразователи поперечных колебаний, 6 — образец, 7 — поворотная платформа, 8 — дополнительный кронштейн, 9 — шкала углов, 10 — указатель.

Fig. 1. Design of the acoustopolariscope with rotating platform (Pat. N 1281993, USSR).

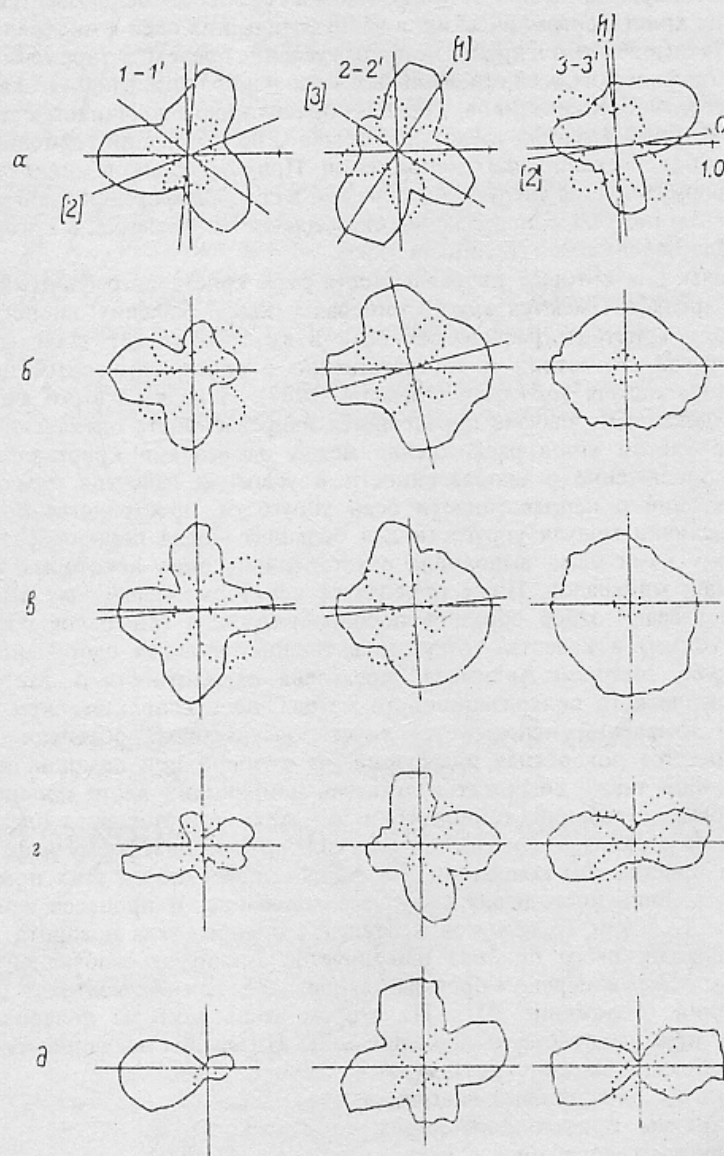


Рис. 2. Акустополариграммы образцов кварца, апатита, микроклина в трех взаимно перпендикулярных направлениях $1-1'$, $2-2'$, $3-3'$. Векторы поляризации параллельны (ВП) — сплошная линия, векторы скрещены (ВС) — пунктир.

a — образец К-1 синтетического кварца. Кристаллографическая ось $[0001]$ проходит в направлении $1-1'$; $б$ — образец апатита А-1. Кристаллографическая ось $[0001]$ проходит в направлении $1-1'$, грань $[1]$ образца соответствует грани (0001) кристалла, грань $[2]$ — грани (2120) кристалла, а грань $[3]$ — грани (1010) кристалла апатита в выбранной кристаллографической установке; $в$ — образец апатита А-1 (повторное измерение); $г$ — образец микроклина М-1. Кристаллографическая ось $[001]$ проходит в направлении $1-1'$, ось $[010]$ в направлении $2-2'$; $д$ — образец микроклина М-2. Кристаллографическая ось $[001]$ проходит в направлении $1-1'$, ось $[010]$ — в направлении $2-2'$.

Fig. 2. Acoustopolarigrams of quartz, apatite and microcline specimens in three perpendicular directions $1-1'$, $2-2'$, $3-3'$. One-piece line — polarization vectors are parallel, dotted line — the vectors are crossed.

На следующем этапе определены скорости распространения продольных и поперечных колебаний в направлениях, согласованных со сторонами куба. Полученные величины скорости представлены в форме квазиматрицы V_{ij} (Горбачевич, 1995). По каждой из трех граней измерены величины D показателя ЛААП (см. таблицу).

Образец синтетического кварца, подготовленный для измерений, имел форму куба с ребром 1 см. Он вырезан так, что его кристаллографическая ось $[0001]$ перпендикулярна грани $(1-1')$ и соответственно параллельна направлению $1-1'$ с точностью 1° . Акустополариграммы этого образца, полученные в трех взаимно перпендикулярных направлениях куба $1-1'$, $2-2'$, $3-3'$, приведены на рис. 2, a . Как следует из акустополариграммы, в направлении $1-1'$ при параллельных векторах поляризации (положение ВП) получена трехлепестковая фигура. Максимальная амплитуда в каждом из лепестков зарегистрирована в направлениях, совпадающих с положением плоскостей упругой симметрии, проходящих через ось $[0001]$. При скрещенных векторах поляризации (положение ВС) зафиксированы диаграммы, имеющие шесть лепестков. Согласно теоретическим представлениям (Горбачевич, 1995), элементы упругой симметрии среды проходят через минимумы амплитуд диаграмм ВС. Таким образом, по

Акустические характеристики кварца, апатита и микроклина
Acoustic characteristics of quartz, apatite and microcline

№ п. п.	Номер образца	Наименование минерала	Удельный вес ρ , г/см ³	Матрица скорости V_{ij} км/с			Показатель ЛААП, D
1	К-1	Кварц синтетический	2.65	6.32	4.32	4.30	0.00
				4.33	5.77	3.64	0.17
				4.00	3.64	5.78	0.07
2	А-1	Апатит	3.12	7.16	3.31	3.25	0.02
				3.35	5.80	3.26	0.01
				3.21	3.21	5.27	0.15
3	М-1	Микроклин	2.53	4.91	3.54	2.94	0.33
				3.67	7.97	2.33	0.05
				2.80	2.30	5.22	0.69
4	М-2	»	2.62	4.89	3.72	3.07	0.90
				3.78	7.88	2.34	0.10
				2.71	2.35	5.43	0.93

диаграмме ВС фиксируются проекции трех плоскостей симметрии, повернутых друг относительно друга на угол $\approx 60^\circ$. Положение этих плоскостей можно фиксировать, как следует из рис. 2, а, со сравнительно большой точностью. В направлении 2—2' акустополариграммы ВП представляют собой четырехлепестковую фигуру, характерную для сред с двумя пересекающимися элементами симметрии. О том же свидетельствуют диаграммы ВС. Положения минимумов диаграмм ВС показывают, что между положением кристаллографической оси (направление 1—1') и элементами упругой симметрии имеется определенный угол, примерно равный 60° . Акустополариграмма ВП, полученная в направлении 3—3', показывает на довольно сложное взаимодействие поляризованных сдвиговых колебаний с элементами упругой симметрии образца кварца. Однако по минимумам диаграммы ВС можно выделить пространственную направленность двух элементов упругой симметрии, положение которых близко к направлению кристаллографической оси (направление 1—1') и перпендикулярно к ней.

Приведенные выше данные показывают применимость акустополаризационного метода определения положения элементов упругой симметрии для сред средних сингоний типа тригональной. Ими подтверждается различие в направленности элементов кристаллографической и упругой симметрии для кристаллов кварца. Ранее данные о пространственном расхождении элементов кристаллографической и упругой симметрий в кварце получили О. И. Силаева, И. С. Делицын, Г. В. Фарнелл (Силаева, Делицын, 1970; Farnell, 1961). Полученные нами значения скорости V_{ij} в целом соответствуют справочным данным (Беликов и др., 1970). Однако величины констант упругости кварца, приводимые в справочниках, измерены вдоль кристаллографических осей и не отражают наибольших и наименьших значений упругости минерала. Измеренный образец кварца практически не проявляет, судя по величинам D , линейной анизотропии поглощения.

Кристалл апатита для изучения был отобран из скарнов Дашкесанского железорудного месторождения. Он представлял собой хорошо ограненный кристалл, образованный комбинацией двух гексагональных призм, гексагональных пирамид и пинакоида. В направлениях, параллельных граням {0001} и {1010}; в кристалле зафиксированы слабые волосовидные микротрещинки несовершенной спайности. Образец для акустополарископии был вырезан из центральной части кристалла в виде прямоугольной призмы с основанием 12×12 мм и ребром 15 мм, ориентированным параллельно кристаллографической оси L_6 в апатите.

Акустополарископия образца апатита выполнена два раза. Сравнение рис. 2, б и в позволяет заметить, что воспроизводимость очертаний акустополариграмм довольно высока. Диаграмма 1—1' получена в направлении оси [0001]. Как следует из диаграмм, полученных по направлениям 1—1' и 2—2' при скрещенных векторах поляризации, проекции элементов упругой симметрии находятся под прямым углом друг к другу и практически перпендикулярно к граням образца. В направлении 3—3' проекции элементов упругой симметрии не выделяются. Выявление проекций элементов упругой симметрии только на двух гранях и их взаимная перпендикулярность свидетельствуют о поперечно-изотропном типе упругой симметрии образца апатита. Ось 3—3' является осью упругой симметрии. Несомненно неожиданным результатом является то, что эта ось расположена по нормали к кристаллографической оси [0001]. В образце апатита заметного проявления эффекта ЛААП не зарегистрировано.

Фрагменты кристаллов микроклина были отобраны в восточной части Кольского полуострова. Образцы микроклина М-1 и М-2 были изготовлены таким образом, чтобы кристаллографическая ось [001] совпадала с направлением 1—1' нормали к грани куба, а ось [010] — с направлением 2—2'. Полученные при скрещенных векторах поляризации акустополариграммы показывают, что направленность проекций элементов упругой симметрии практически перпендикулярна граням образцов (рис. 2, г, д). Проекция элементов упругой симметрии наблюдаются во всех трех взаимно перпендикулярных

направлениях. Это свидетельствует о том, что микроклин обладает типом упругой симметрии не выше ромбического. Данный вывод подтверждается анализом соотношений величин скорости в матрице V_{ij} (см. таблицу).

В образцах микроклина М-1 и М-2 очень ярко проявляется эффект ЛААП. В направлениях $1-1'$ и $3-3'$ этих образцов при параллельных векторах поляризации зарегистрированы акустополариграммы, диаметр которых вдоль одного направления значителен, а вдоль другого, перпендикулярного первому, — очень мал. Такое явление наблюдается в том случае, когда в твердом теле имеются линейные или плоскостные элементы, ориентированные в одном направлении и отличающиеся акустическими свойствами. В этом случае если направление вектора поляризации сдвиговых колебаний будет совпадать с направлением простираения структурных элементов, то поглощение энергии колебаний будет минимальным. Энергия колебаний будет интенсивно поглощаться при векторе поляризации, направленном по нормали к структурным элементам (Горбачевич, 1990). Оптическим аналогом наблюдаемого эффекта является плеохроизм.

Показатели степени проявления ЛААП обр. М-1 и М-2 очень велики. Например для первой, второй и третьей пары граней обр. М-2 они соответственно равны $D_1 = 0.90$, $D_2 = 0.10$ и $D_3 = 0.93$. Судя по направленности наибольших диаметров акустополариграмм ВП граней $1-1'$ и $3-3'$, в обр. М-1 и М-2 зарегистрирован линейный тип проявления этого эффекта (Горбачевич, 1995). Наиболее вероятным объяснением наблюдаемого явления ЛААП, как и линейности его типа, является следующее. В кристаллах микроклина в направлении кристаллографической оси $[001]$ наблюдается совершенная спайность. Ее плоскости параллельны плоскости $\{010\}$ кристалла. В направлении $[010]$ также наблюдается совершенная спайность, но ее плоскости параллельны плоскости $\{001\}$. В направлении образца-куба $2-2'$ плоскости этих двух систем спайности пересекаются с углом, близким к прямому. По этой причине мы наблюдаем сильное проявление эффекта ЛААП в направлении $1-1'$ от одной спайности, а в направлении $3-3'$ от другой. В направлении $2-2'$ сигнал ослабляется в одинаковой степени как от одной спайности, так и от другой. Поэтому проявления ЛААП в направлении $2-2'$ не зарегистрировано.

Впервые эффект линейной акустической анизотропии поглощения обнаружен в породах нижней части разреза Кольской сверхглубокой скважины (Горбачевич, 1995). Его наличие зарегистрировано в 90 % от числа образцов пород из интервала глубин 4.5—12.06 км. Сильное проявление ЛААП в микроклин позволяет сделать вывод, что наблюдение этого эффекта в кристаллических породах свидетельствует о содержании в них того или иного минерала.

В научной литературе нам не приходилось встречать сведения о проявлении явления линейной акустической анизотропии поглощения в минералах и горных породах. По всей видимости, проявления ЛААП и плеохроизма в минералах не связаны между собой. Например, микроклин практически не проявляет плеохроизма (Трегер, 1968). Приведенные результаты демонстрируют высокую информативность метода акустополарископии применительно к исследованию физических свойств минерала.

Авторы выражают искреннюю благодарность Н. Н. Девниной, А. М. Карпунину, Ю. М. Кириарскому, К. И. Полякову, В. И. Старостину за предоставленные образцы минералов, полезные консультации и обсуждение результатов экспериментов. Работа выполнена по гранту Российского фонда фундаментальных исследований, № 97-05-64167.

Список литературы

- Беликов Б. П., Александров К. С., Рыжова Т. В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород М.: Наука, 1970. 274 с.
- Горбачевич Ф. Ф. Анизотропия поглощения сдвиговых колебаний в горных породах // Физика Земли. 1990. № 5. С. 70—79.
- Горбачевич Ф. Ф. Акустополарископия горных пород. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1995. 204 с.
- Делицын И. С. Структурообразование кварцевых пород. М.: Наука, 1985. 190 с.
- Казаков А. Н. Динамический анализ микроструктурных ориентировок минералов. Л.: Наука, 1987. 272 с.
- Кожевников В. Н. Условия формирования структурно-метаморфических парагенезисов в докембрийских комплексах. Л.: Наука, 1982. 184 с.
- Силаева О. И., Делицын И. С. Скорость продольных волн в кристалле искусственного кварца // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1970. № 2. С. 78—80.
- Трегер В. Е. Оптическое определение породообразующих минералов. М.: Недра, 1968. 197 с.
- Brace W. F. Orientation of anisotropic minerals in a stress field: discussion // Mem. Geol. Soc. Amer. 1960. Vol. 79. N 9. P. 9—20.
- Farnell G. W. Elastic waves in trigonal crystals // Canad. J. Phys. 1961. Vol. 39. P. 65—80.