ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДЕМПФИРОВАННЫХ ПЛАСТИНЧАТЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОВЁРНУТЫХ СРЕЗОВ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Ковалевский М.В.

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, koval@geoksc.apatity.ru

Аннотация

В задачах геофизики и сейсмологии используются датчики упругих волн. В работе представлены расчёты режимов излучения и приёма для демпфированных пластинчатых преобразователей повёрнутых срезов с целью возбуждения продольных и поперечных ультразвуковых колебаний. При этом поперечные волны не являются следствием трансформации продольных волн. Получены системы уравнений для режима излучения и режима приёма.

Общие требования к источникам и приёмникам колебаний

Для реализации метода акустополярископии [1, 2] измерительная аппаратура должна включать в себя преобразователи поперечных линейно-поляризованных колебаний.

Исходя из особенностей акустических методов [3, 4] измерения скорости ультразвука, можно отметить, что с точки зрения оперативности и простоты применения метод сравнения является наилучшим. Несмотря на относительную неточность, в большинстве случаев это не является серьёзным недостатком, так как удовлетворяет требованиям к допустимым погрешностям [5]. Именно поэтому последние работы, проводимые в Геологическом институте КНЦ РАН, были нацелены на модернизацию и усовершенствование методики измерений и аппаратуры, реализующей данный метод [6-8].

Для измерения величин фазовой скорости в анизотропных средах следует применять импульсные источники [1], излучающие волны с локально плоскими фронтами и достаточно узкой диаграммой направленности, изготовленные в виде диска с диаметром $d \gg \lambda$, где λ – длина преобладающей волны, элементы которого колеблются синхронно.

Большое затухание в горных породах заставляет выбирать наиболее низкую частоту импульсных источников и приёмников колебаний. С другой стороны, параметры направленности излучения должны быть таковыми, чтобы боковые отражения от граней образца не оказывали влияния на форму переднего фронта и амплитуду импульса, принимаемого приёмником.

Для оценки преобладающей частоты f_0 импульса, излучаемом преобразователем диаметром d через кубический образец толщиной l , используется геометрический способ. В сохранных горных породах средняя скорость распространения квазипоперечных колебаний составляет $V_s \approx 3000$ м/с [9]. Следовательно, например при $d=3$ см и $l=4$ см величина $f_0 \geq 0.412$ МГц. Наблюдения, опыт которых изложен в [10] показали, что удовлетворительные условия измерения достигаются при $f_0 \approx 0.5$ МГц или отношении $d/\lambda \geq 5$.

Однако главным требованием к источникам и приёмникам колебаний является их высокая эффективность, необходимая, для определения величин скоростей распространения упругих колебаний в сильно поглощающих горных породах.

Так ранее было предложено использовать повернутые срезы пьезокристаллов для возможности одновременного возбуждения продольных и поперечных волн. Были рассчитаны и разработаны конструкции двумодовых преобразователей на основе недемпфированных полуволновых пьезопластин повернутых срезов (LiNbO_3) и пьезокерамики.

В процессе изготовления преобразователей для акустической системы прибора типа УЗИС-ГЭТУ были выявлены некоторые недостатки конструкции. Так, в процессе изготовления преобразователей из повернутых срезов пьезокерамики возникла сложность металлизации пластины. Это связано с тем, что для изготовления повернутых срезов, готовый образец пьезокерамики необходимо разрезать под требуемым углом. При этом рабочие грани неметаллизированны. Для возобновления металлизации, можно воспользоваться одним из следующих возможных технологических процессов:

1. Вжигание серебра,
2. Вакуумное напыление металлом пластинки,
3. Химическое осаждение серебра (реакция «серебряного зеркала»).

Все методы имеют недостатки. В первых двух случаях необходим нагрев металла, что может привести к частичной располяризации керамики. Для третьего метода основная проблема связана с очисткой поверхности (пористость материала, следовательно, трудно удалить загрязнения). Возможным путём преодоления данной проблемы, может служить использование проводимости сред, контактирующих с пьезопластиной. Так со стороны образца пьезопластина контактирует с буферным стержнем. Он может быть изготовлен из металла (сталь, титан), либо металлизированных диэлектрических материалов (плавленый кварц). С тыльной же стороны пластины можно использовать демпфер. Однако тыльная нагрузка изменяет характеристики работы пьезопластины. Поэтому такой метод решения проблемы (вариант конструкции) требует дополнительного анализа работы демпфированных двурезонансных преобразователей и оптимизации на основе выполненных расчётов конструкции преобразователей акустической системы.

Теоретический анализ демпфированных пластинчатых преобразователей повернутых срезов

Постановка задачи

Полагаем, что поперечные размеры преобразователя значительно превышают длину звуковой волны. Это даёт возможность решать задачу в одномерном приближении, используя волновой метод (т.е. рассматриваем колебания в системе, как совокупность встречно распространяющихся волн различных типов).

Рассматриваемый преобразователь представляет собой пластину, выполненную из пьезокерамики (например, ЦТС-19). Модули упругости, пьезоэлектрические постоянные и диэлектрические проницаемости пьезокерамики описываются следующими матрицами:

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix}.$$

Пластина поляризована в направлении оси Z , которая является осью симметрии порядка ∞ . Параллельная этой оси плоскость YZ является плоскостью симметрии.

Пространственная ориентация пластины показана на рис. 1. Задачу будем решать в новой системе координат $X'Y'Z'$, которая связана с прежней следующей таблицей направляющих косинусов:

Оси	X	Y	Z
X'	1	0	0
Y'	0	$\cos\theta$	$\sin\theta$
Z'	0	$-\sin\theta$	$\cos\theta$

При этом вид матриц упругости, пьезоэлектрических постоянных и диэлектрических проницаемостей примет вид:

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{34} & 0 & 0 \\ c_{14} & c_{24} & c_{34} & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & c_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{56} & c_{66} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & e_{24} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & c_{34} & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ 0 & \varepsilon_{23} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix}.$$

Считая колебания пластины одномерными и учитывая геометрию задачи, приходим к следующим выражениям для деформаций и напряжённостей электрического поля:

$$U_1 = \frac{\partial \xi_x}{\partial x} = 0, \quad U_2 = \frac{\partial \xi_y}{\partial y} = 0, \quad U_3 = \frac{\partial \xi_z}{\partial z} \neq 0, \\ U_4 = \frac{\partial \xi_z}{\partial y} + \frac{\partial \xi_y}{\partial z} \neq 0, \quad U_5 = \frac{\partial \xi_z}{\partial x} + \frac{\partial \xi_x}{\partial z} = 0, \quad U_6 = \frac{\partial \xi_y}{\partial x} + \frac{\partial \xi_x}{\partial y} = 0,$$

$$E_1 = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad E_2 = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}.$$

При этом известные уравнения пьезоэффекта в матричных обозначениях:

$$\sigma_i = C_{ik}^E \cdot U_k - e_{ij} \cdot E_j,$$

$$D_p = \xi_{pq}^U \cdot E_q + e_{pr} \cdot U_r$$

дают для компонент механических напряжений и электрической индукции следующие выражения:

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= C_{33}^E \cdot U_3 + C_{34}^E \cdot U_4 - e_{33} \cdot E_3; \\ \sigma_4 &= C_{34}^E \cdot U_3 + C_{44}^E \cdot U_4 - e_{34} \cdot E_3; \\ \sigma_5 &= C_{55}^E \cdot U_5; \\ D_3 &= \xi_{33}^U \cdot E_3 + e_{33} \cdot U_3 + e_{34} \cdot U_4. \end{aligned} \quad (1)$$

Рис. 1. Пространственная ориентация пластины.

В режиме излучения причиной колебаний пластины является компонента электрического поля E_3 , поэтому видно, что деформация U_5 , не связанная с электрическим полем, не возникает ($U_5=0$). В режиме приёма причиной колебаний является падающая на пластину волна, однако и здесь всегда можно сориентировать пластину так, чтобы деформация U_5 не возникла.

Работа преобразователя в режиме излучения.

Система волн в режиме излучения представлена на рис. 2. Здесь A_p , A_r , B_p , B_r – амплитуды колебательных скоростей продольных и поперечных волн, распространяющихся в средах.

Колебательные скорости в волнах могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} \vec{\xi}^{(n)} &= \vec{\xi}_0^{(n)} \cdot \exp[j(\omega t - k^{(n)} z)]; \\ \vec{\xi}_0^{(n)} &= \xi_0^{(n)} \cdot \sum_{i=1}^3 \vec{e}_i p_i^{(n)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\xi_0^{(n)}$ – амплитуда, $k^{(n)}$ и $p_i^{(n)}$ – соответственно волновое число и направляющие косинусы вектора колебательной скорости для n -ой волны, $\vec{e}_i$ – единичный вектор.

Рис. 2. Схема работы преобразователя в режиме излучения. 1 – пьезопластина; 2, 4 – акустический контакт; 3 – буферный стержень; 5 – демпфер.

Скорости и направления векторов смещения в пьезопластине рассчитаем с помощью соотношений теории Кристоффеля [11]:

$$(\theta_{im}^* - \rho c^2 \delta_{im}) p_m = 0; \quad (3)$$

$$|\theta_{im}^* - \rho c^2 \delta_{im}| = 0. \quad (4)$$

$$\theta_{im} = C_{iklm}^E \cdot l_k \cdot l_l; \quad \theta_n = C_{1331}^E = C_{55}^E; \quad \theta_{22} = C_{2332}^E = C_{44}^E; \quad \theta_{33} = C_{3333}^E = C_{33}^E;$$

$$\theta_{12} = C_{1332}^E = C_{45}^E; \quad \theta_{13} = C_{1333}^E = C_{35}^E; \quad \theta_{23} = C_{2333}^E = C_{34}^E;$$

$$\theta'_{im} = \frac{a_i \cdot a_m}{b}; \quad a_i = e_{jki} \cdot l_j \cdot l_k; \quad b = \varepsilon_{tv}^U \cdot l_t \cdot l_v;$$

$$\theta'_{11} = 0; \quad \theta'_{21} = \theta'_{13} = 0; \quad \theta'_{22} = \frac{e_{34}^2}{\varepsilon_{33}^U}; \quad \theta'_{33} = \frac{e_{33}^2}{\varepsilon_{33}^U}; \quad \theta'_{23} = \frac{e_{34} \cdot e_{33}}{\varepsilon_{33}^U}; \quad \theta_{im}^* = \theta_{im} + \theta'_{im}.$$

Подставив значение θ'_{im} в (3) и (4), имеем:

$$\begin{vmatrix} \theta_{11} - \rho c^2 & 0 & 0 \\ 0 & \theta_{22} - \rho c^2 & \theta_{23}^* \\ 0 & \theta_{23}^* & \theta_{33} - \rho c^2 \end{vmatrix} = 0; \quad (\theta_{22}^* - \rho c^2) p_2 + \theta_{23}^* p_3 = 0; \quad \theta_{23}^* p_2 + (\theta_{33}^* - \rho c^2) p_3 = 0. \quad (5)$$

Решая систему уравнений (5), находим:

$$(\rho c^2)_{l,\tau} = \frac{\theta_{22}^* + \theta_{33}^*}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\theta_{22}^* - \theta_{33}^*)^2 + 4(\theta_{23}^*)^2},$$

откуда:

$$c_{l,\tau} = \sqrt{\frac{(\theta_{22}^* + \theta_{33}^*) \pm \sqrt{(\theta_{22}^* - \theta_{33}^*)^2 + 4(\theta_{23}^*)^2}}{2\rho}} \quad (6)$$

Дополним уравнение (5) условием нормировки векторов смещения:
 $p_2^2 + p_3^2 = 1$. Следовательно, можно найти величины P_{l_2} , P_{l_3} , P_{τ_2} и P_{τ_3} :

$$\frac{P_{l_2}}{P_{l_3}} = -\frac{\theta_{23}^*}{\theta_{22}^* - \rho c_{l_2}^2}; \quad \frac{P_{\tau_2}}{P_{\tau_3}} = -\frac{\theta_{23}^*}{\theta_{22}^* - \rho c_{\tau_2}^2}; \quad p_{l_2}^2 + p_{l_3}^2 = 1; \quad p_{\tau_2}^2 + p_{\tau_3}^2 = 1.$$

Таким образом, в результате мы получили систему уравнений, которая определяет работу преобразователя в режиме излучения:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_l^{(1)} a_{0,0} + B_l^{(1)} a_{0,1} + A_l^{(1)} a_{0,2} + B_l^{(1)} a_{0,3} + A_l^{(2)} a_{0,4} + B_l^{(2)} a_{0,5} = 0 \\ A_l^{(1)} a_{1,0} + B_l^{(1)} a_{1,1} + A_l^{(1)} a_{1,2} + B_l^{(1)} a_{1,3} + A_l^{(2)} a_{1,6} + B_l^{(2)} a_{1,7} = 0 \\ A_l^{(2)} a_{2,4} + B_l^{(2)} a_{2,5} + A_l^{(3)} a_{2,8} = 0 \\ A_l^{(2)} a_{3,6} + B_l^{(2)} a_{3,7} + A_l^{(3)} a_{3,9} = 0 \\ A_l^{(1)} a_{4,0} + B_l^{(1)} a_{4,1} + A_l^{(1)} a_{4,2} + B_l^{(1)} a_{4,3} + A_l^{(4)} a_{4,10} + B_l^{(4)} a_{4,11} = 0 \\ A_l^{(1)} a_{5,0} + B_l^{(1)} a_{5,1} + A_l^{(1)} a_{5,2} + B_l^{(1)} a_{5,3} + A_l^{(4)} a_{5,12} + B_l^{(4)} a_{5,13} = 0 \\ A_l^{(4)} a_{6,10} + B_l^{(4)} a_{6,11} + B_l^{(5)} a_{6,14} = 0 \\ A_l^{(4)} a_{7,12} + B_l^{(4)} a_{7,13} + B_l^{(5)} a_{7,15} = 0 \\ A_l^{(1)} a_{8,0} + B_l^{(1)} a_{8,1} + A_l^{(1)} a_{8,2} + B_l^{(1)} a_{8,3} + A_l^{(4)} a_{8,10} + B_l^{(4)} a_{8,11} = e_{33} \frac{V}{d} \\ A_l^{(1)} a_{9,0} + B_l^{(1)} a_{9,1} + A_l^{(1)} a_{9,2} + B_l^{(1)} a_{9,3} + A_l^{(4)} a_{9,12} + B_l^{(2)} a_{9,13} = e_{34} \frac{V}{d} \\ A_l^{(2)} a_{10,4} + B_l^{(2)} a_{10,5} + A_l^{(3)} a_{10,8} = 0 \\ A_l^{(2)} a_{11,6} + B_l^{(2)} a_{11,7} + A_l^{(3)} a_{11,9} = 0 \\ A_l^{(1)} a_{12,0} + B_l^{(1)} a_{12,1} + A_l^{(1)} a_{12,2} + B_l^{(1)} a_{12,3} + A_l^{(2)} a_{12,4} + B_l^{(2)} a_{12,5} = e_{33} \frac{V}{d} \\ A_l^{(1)} a_{13,0} + B_l^{(1)} a_{13,1} + A_l^{(1)} a_{13,2} + B_l^{(1)} a_{13,3} + A_l^{(2)} a_{13,6} + B_l^{(2)} a_{13,7} = e_{34} \frac{V}{d} \\ A_l^{(4)} a_{14,10} + B_l^{(4)} a_{14,11} + B_l^{(5)} a_{14,14} = 0 \\ A_l^{(4)} a_{15,12} + B_l^{(4)} a_{15,13} + B_l^{(5)} a_{15,15} = 0 \end{array} \right. \quad (7)$$

Значения коэффициентов a_{ij} достаточно объёмны и приведены в [4].

Рис. 3. Схема работы преобразователя в режиме приёма. 1 – пьезопластина; 2, 4 – акустический контакт; 3 – буферный стержень; 5 – демпфер.

Работа преобразователя в режиме приёма

Подход к решению задачи в режиме приёма аналогичен, однако в этом случае имеется ряд особенностей. Система волн в режиме приёма приведена на рис. 3. Отличие от режима излучения состоит в наличии падающей волны (продольной или поперечной).

Хотя амплитуда падающей волны известна, однако, в режиме приёма не известно электрическое напряжение, развиваемое пьезопластиной на внешней электрической нагрузке. Поэтому количество уравнений в режиме приёма на единицу больше, чем в режиме излучения. Следовательно, для решения задачи необходимо ещё одно уравнение. В качестве этого уравнения будем использовать выражение для тока, протекающего через пьезопластину:

$$I_n = j\omega D_3 S = j\omega S \frac{\varepsilon_{33}^U V'}{d} + S \frac{e_{33}}{d} (\xi_{zd} - \xi_{z0}) + S \frac{e_{34}}{d} (\xi_{yd} - \xi_{y0}), \quad (8)$$

где V' – электрическое напряжение в режиме приёма,

$$C_n = S \frac{\varepsilon_{33}^U}{d}; \quad S = \pi \frac{D^2}{4}.$$

Очевидно, что

$$|I_n| = |V' \cdot Y|, \quad (9)$$

где Y – проводимость внешней цепи.

С учётом (8), (9) и наличия продольной падающей волны для режима приёма, некоторые члены системы уравнений (7) приобретут следующий вид:

$$\begin{cases} A_l^{(2)}a_{2,4} + B_l^{(2)}a_{2,5} + A_l^{(3)}a_{2,8} = B_l^{(3)} \\ A_l^{(1)}a_{8,0} + B_l^{(1)}a_{8,1} + A_l^{(1)}a_{8,2} + B_l^{(1)}a_{8,3} + A_l^{(4)}a_{8,10} + B_l^{(4)}a_{8,11} + Va_{8,16} = 0 \\ A_l^{(1)}a_{9,0} + B_l^{(1)}a_{9,1} + A_l^{(1)}a_{9,2} + B_l^{(1)}a_{9,3} + A_l^{(4)}a_{9,12} + B_l^{(2)}a_{9,13} + Va_{9,16} = 0 \\ A_l^{(2)}a_{10,4} + B_l^{(2)}a_{10,5} + A_l^{(3)}a_{10,8} = Zl \\ A_l^{(1)}a_{12,0} + B_l^{(1)}a_{12,1} + A_l^{(1)}a_{12,2} + B_l^{(1)}a_{12,3} + A_l^{(2)}a_{12,4} + B_l^{(2)}a_{12,5} + Va_{12,16} = 0 \\ A_l^{(1)}a_{13,0} + B_l^{(1)}a_{13,1} + A_l^{(1)}a_{13,2} + B_l^{(1)}a_{13,3} + A_l^{(2)}a_{13,6} + B_l^{(2)}a_{13,7} + Va_{13,16} = 0 \end{cases}$$

и добавится дополнительное уравнение

$$A_l^{(1)}a_{16,0} + A_l^{(1)}a_{16,2} + B_l^{(1)}a_{16,1} + B_l^{(1)}a_{16,3} - V'(j\omega C_n + Y) = 0$$

Значения коэффициентов $a_{i,j}$, Zl достаточно объёмны и приведены в [4].

Переходя к относительным амплитудам во всех волнах системы можно переписать эту систему, положив $B_l^{(3)}=1$.

Аналогично с учётом (8), (9) и наличия поперечной падающей волны для режима приёма, некоторые члены системы уравнений (7) приобретут следующий вид:

$$\begin{cases} A_t^{(2)}a_{3,6} + B_t^{(2)}a_{3,7} + A_t^{(3)}a_{3,9} = B_t^{(3)} \\ A_l^{(1)}a_{8,0} + B_l^{(1)}a_{8,1} + A_l^{(1)}a_{8,2} + B_l^{(1)}a_{8,3} + A_l^{(4)}a_{8,10} + B_l^{(4)}a_{8,11} + Va_{8,16} = 0 \\ A_l^{(1)}a_{9,0} + B_l^{(1)}a_{9,1} + A_l^{(1)}a_{9,2} + B_l^{(1)}a_{9,3} + A_l^{(4)}a_{9,12} + B_l^{(2)}a_{9,13} + Va_{9,16} = 0 \\ A_t^{(2)}a_{11,6} + B_t^{(2)}a_{11,7} + A_t^{(3)}a_{11,9} = Zt \\ A_l^{(1)}a_{12,0} + B_l^{(1)}a_{12,1} + A_l^{(1)}a_{12,2} + B_l^{(1)}a_{12,3} + A_l^{(2)}a_{12,4} + B_l^{(2)}a_{12,5} + Va_{12,16} = 0 \\ A_l^{(1)}a_{13,0} + B_l^{(1)}a_{13,1} + A_l^{(1)}a_{13,2} + B_l^{(1)}a_{13,3} + A_l^{(2)}a_{13,6} + B_l^{(2)}a_{13,7} + Va_{13,16} = 0 \\ A_t^{(2)}a_{15,12} + B_t^{(2)}a_{15,13} + B_t^{(5)}a_{15,15} = 0 \end{cases}$$

и добавится дополнительное уравнение

$$A_t^{(1)}a_{16,0} + A_t^{(1)}a_{16,2} + B_t^{(1)}a_{16,1} + B_t^{(1)}a_{16,3} - V'(j\omega C_n + Y) = 0$$

Значения коэффициентов $a_{i,j}$, Zt достаточно объёмны и приведены в [4].

Переходя к относительным амплитудам во всех волнах системы можно переписать эту систему, положив $B_t^{(3)}=1$.

Таким образом, в результате проведенных расчётов были получены системы уравнений для режима излучения и режима приёма демпфированных пластинчатых преобразователей повернутых срезов для возбуждения продольных и поперечных ультразвуковых колебаний. На основе данных определений можно проводить расчёты амплитудно-частотных характеристик датчика с созданием опытно-экспериментальной модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-05-00026-а.

Список литературы

4. Горбачевич Ф.Ф. Акустополарископия горных пород. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 1995. 204 с.
5. Горбачевич Ф.Ф. Акустополарископия породообразующих минералов и кристаллических пород. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 2002. 140 с.
6. Колесников А. М. Акустические измерения М.: Наука. 1985. 254 с.
7. Ковалевский М.В. Повышение информативности акустополаризационного метода определения упругих характеристик горных пород: Дис. к.т.н. СПб. 2002. 202 с.
8. Фадеев М.А. Элементарная обработка результатов эксперимента. Уч. пос. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ. 2010. 122 с.
9. Ковалевский М.В. К вопросу о разработке методики определения скоростных соотношений упругих волн в задачах акустополарископии // Материалы XVIII молодеж. науч. конф. Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии. СПб.: ЛЕМА. 2007. С.183-185.
10. Ковалевский М.В. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс Acoustpol: Уч. пос. Апатиты. Изд-во К&М. 2009. 54 с.
11. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс Acoustpol (АПАКА) для оценки качества материалов и объектов из природного камня // Контрольно-измерительные приборы и системы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 4. С. 10.
12. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. М.: Недра. 1975. 279 с.
13. Беликов Б.П., Александров К.С., Рыжова Т.В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. М.: Наука. 1970. 276 с.
14. Яковлев Л.А. Распространение и отражение упругих волн в звукопроводах акустоэлектронных устройств / ЛЭТИ. Л. 1980.