

ОЦЕНКА СООТНОШЕНИЙ АМПЛИТУД И ЭНЕРГИЙ ПРИ ПАДЕНИИ ПРОДОЛЬНОЙ ВОЛНЫ НА ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА НЕКОТОРЫХ АРХЕЙСКИХ ПОРОД В РАЗРЕЗЕ КОЛЬСКОЙ СВЕРХГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЫ (СГ-3)

<https://doi.org/10.31241/MIEN.2018.14.17>

Горбачевич Ф.Ф., Тришина О.М.

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

Земная кристаллическая кора, в особенности содержащая толщи метаморфизованных и метасоматических пород, имеет сложное строение. Причиной этого является длительная геолого-геодинамическая эволюция древних пород, находящихся в поле сил переменной величины, главные из которых гравитация и тектонические напряжения. В течении геологического времени отдельные блоки, массивы пород, изгибались, поднимались и опускались по отношению к земной поверхности. Причем, влияние этих переменных сил и деформаций сказывается на уровне отдельной породной разновидности и даже формы отдельных зерен. Все эти причины приводят к очень сложной картине отражения и прохождения сейсмических лучей при геофизической разведке массивов, расположенных на глубине. Интерпретация результатов глубинного сейсмического зондирования в кристаллических метаморфизованных породах наталкивается на значительные трудности. Наиболее яркий пример наблюдается при анализе результатов глубинного сейсмического зондирования на профиле, проходящем через Кольскую сверхглубокую скважину. На рис. 1 приведена северная часть сейсмического мигрированного разреза по профилю КОЛА ОГТ-92 [9]. На этом разрезе трудно выделить какие-либо детальные структурные элементы, особенно в его архейской части, отвечающие реально существующим в массиве. С одной стороны это вызвано частым чередованием толщ пород, контрастными по своим сейсмическим свойствам, зачастую залегающих под крутыми углами к земной поверхности. С другой стороны, кристаллические породы под влиянием глубинных тектонических давлений и температур часто в различной степени метаморфизованы. Это приводит к появлению скоростной анизотропии пород [2].

Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3) находится на северо-западе Кольского полуострова. Она пройдена в северном крыле Печенгской геосинклинали, сложенной ритмично переслаивающимися вулканогенными и туфогенно-осадочными толщами, простирающимися на СЗ 300-310° и падающими на ЮЗ под углами 30-50° [3, 4]. Геологический разрез скважины СГ-3, достигший опережающим стволом отметки 12262 м, представлен двумя комплексами: протерозойским и архейским.

Архейский комплекс состоит из очень широкого спектра пород от ультраосновного до кислого составов, разной степени переработки, метаморфизованности, структурных и текстурных особенностей и поэтому

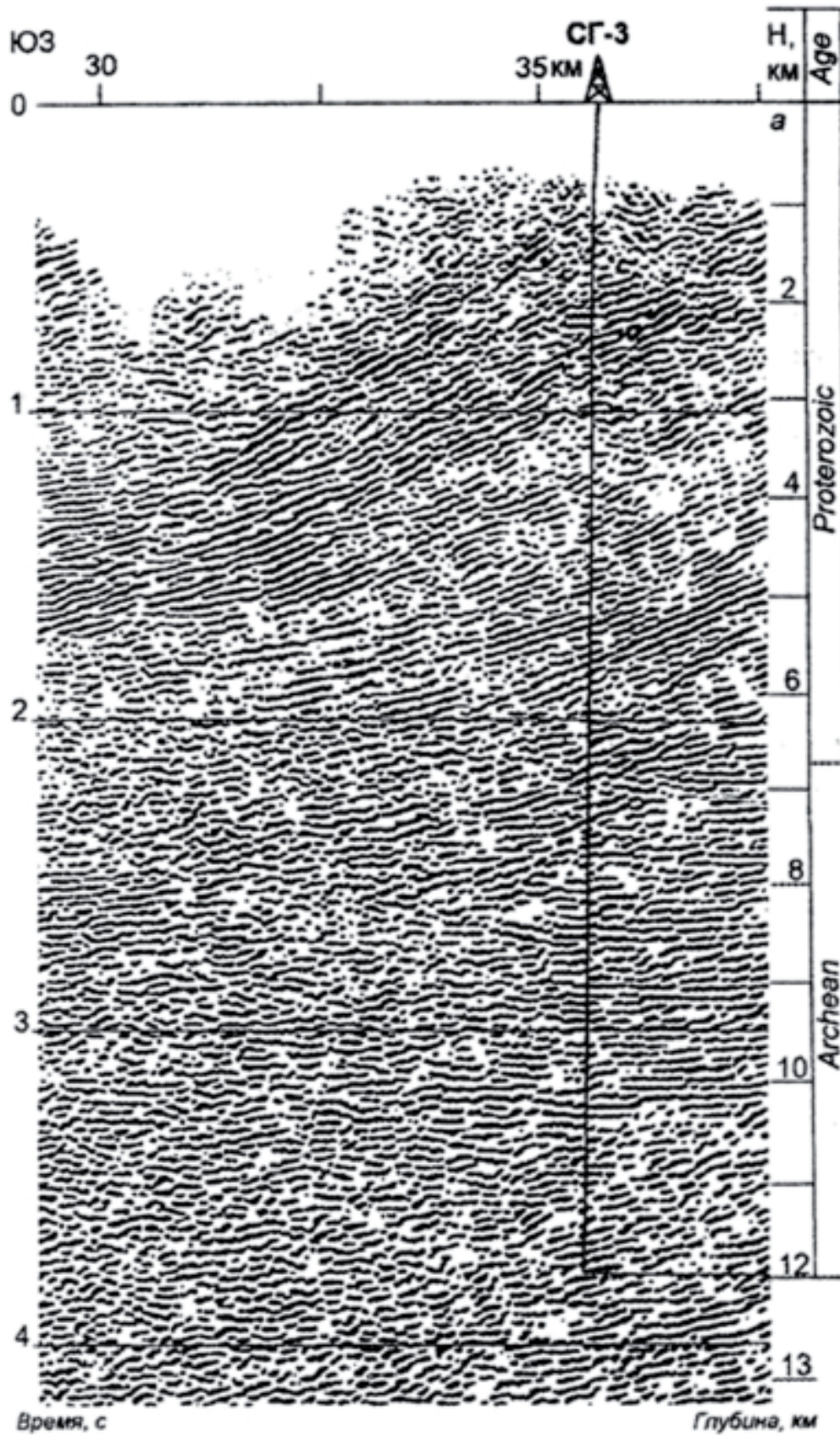


Рис.1. Северная часть мигрированного разреза по профилю КОЛА ОГТ-92 в районе скважины СГ-3 [9].

Таблица 1. Минеральный состав и структура пород образцов из архейской части разреза СГ-3.

Номер образца	Глубина	Минеральный состав, %	Определение породы
<i>Гнейсы</i>			
24653	7534.9	Pl-50, Qtz-35, Bt-15, Ms, Zrn, Mag	Биотитовые гнейсы
301026	8575.7	Pl-65-70, Qtz-25-30, Bt-5, Ttn, Ap, Ep, Mag	Биотитовые гнейсы с эпидотом и р.з. магнетита
31406	8807.4	Pl-68-73, Ms-1, Qtz-30-25, Ms-1-2, Bt, Ep, Cb, Zrn, Mag, Ttn	Биотитовые гнейсы с р. з. сульфидов
31489	8833.4	Pl-67, Ms-5, Qtz-25, Bt-2, Ms-1, Ep, Ap, Ttn	Биотитовые гнейсы слабо мусковитизированные
39965	10943.8	Pl-68, Qtz-20, Bt-10, Ep-1, Ap-1, Ttn-р.з.	Биотитовые гнейсы
40069	10994.9	Pl-35, Ms-25, Qtz-35, Bt-3, Ms-2, Ep-ед.з.	Биотитовые гнейсы
<i>Сланцы</i>			
24864	7667.3	Pl-65, Qtz-20-25, Bt-10-15, Ms, Ttn, Ap	Биотит-амфиболитовые сланцы с эпидотом
26996	8010.6	Pl-15, Qtz-5, Hbl-80, Ep	Плагиоклаз-амфиболовые сланцы окварцованные
31225	8755.2	Qtz-20, Hbl -45, Bt-20, Ep-15, Ttn, Mag, Chl	Эпидот-кварц-биотит-плагиоклаз-амфиболовые сланцы со сф. и вкрап. слф
37632-3	10136.2	Pl-77, Qtz-1, Hbl -20, Di, Ep-1, Ttn, Ap	Эпидот-амфибол-плагиоклазовые сланцы с мон. пироксеном
41146	11323.8	Pl-25, Qtz-4, Hbl-35, Bt-35, Ep-1	Амфибол-плагиоклаз-биотитовые сланцы с эпидотом
41384-2	11387.1	Pl-25, Qtz-4, Hbl-35, Bt-35, Ep-1	Эпидот-биотит-амфибол-плагиоклазовые сланцы
<i>Амфиболиты</i>			
24956	7687.6	Pl-20-30, Qtz-5-10, Hbl-60, Mag-5, Bt, Ap, Chl, Ttn	Амфиболиты со сфеном
31094	8719.6	Pl-50-55, Qtz-5, Hbl-50-45, Ap, Bt, Mag	Амфиболиты
31918	8951.9	Pl-42, Ms-3, Hbl-50, Bt-5, Ttn, Ep, Ap	Амфиболиты сланцеватые со сфеном и биотитом
34847	9266.3	Qtz-1, Hbl-89, Bt-10, Ttn, Mag	Амфиболиты с вкрап. слф. слюдистые
37414	10060.6	Pl-28, Hbl-70, Ttn-1, Mag-1, Bt, Ap	Амфиболиты меланократовые
37445	10079.0	Hbl-78, Bt-20, Mag-2, Ap, Qtz	Биотитовые амфиболиты

Примечание. Обозначения минералов приведены по [12].

представляет интерес для всестороннего изучения. Для проведения исследований из диапазона глубин 7263-11487 м нами были отобраны 18 образцов керна основных пород Кольской сверхглубокой скважины СГ-3.

Отобранные образцы представлены в основном гнейсами, сланцами, амфиболитами. Описание структуры пород и их минерального состава содержится в табл. 1. Как правило, образцы пород, отобранные на земной поверхности, из-за влияния процессов выветривания и других причин, имеют более низкие плотностные и скоростные характеристики (ρ , V_p , V_s), чем те, которые находятся на глубинах 0.1-3 км и глубже [5, 10]. Этот диапазон глубин наиболее интересен для разведочной геофизики. В ряде работ показано, что различия в показателях ρ , V_p , V_s на больших глубинах определяются их минеральным составом [1, 2, 6, 7].

С учетом конкретного минерального состава породы рассчитывался вклад каждого минерала в общее значение средней скорости в породной разновидности. Расчеты выполнены по формуле [1]:

$$\ln V_k = \frac{\sum P_i \ln(V_i)}{\sum P_i}, \quad (1)$$

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 качестве исходных данных взят минеральный состав породы и соответствующие средние величины скорости в каждом конкретном минерале [1, 11].

Петрофизические свойства образцов приведены в табл. 2. В ней представлены: плотность рассчитанная по минеральному составу (ρ_c), средние скорости распространения продольных (V_{pc}) и поперечных (V_{sc}), волн.

При падении продольной волны P во второй среде образуются следующие волны: отраженная продольная волна PP_1 , отраженная поперечная волна PS_1 , проходящая продольная волна PP_2 и проходящая поперечная волна PS_2 , рис. 2.

Расчет коэффициентов отражения продольной K_{PP_1} , отраженной поперечной K_{PS_1} , проходящей продольной K_{PP_2} и проходящей поперечной волн K_{PS_2} производился по формулам (2) [9].

Аналогичные формулы для расчёта коэффициентов отражения и прохождения волн по энергии приведены в работе [9]. Нами, с помощью программы Mathcad, по формулам (2) выполнен расчет коэффициентов отражения и прохождения упругих волн на границе раздела сланцев и гнейсов, сланцев и амфиболитов, гнейсов и амфиболитов. Такие же расчеты выполнены по энергии каждой проходящей и отраженной волны.

Таблица 2. Петрофизические свойства образцов пород
из архейской части разреза СГ-3.

Номер образца	Наименование породы	Глубина, м	ρ_c , г/см ³	V_{pc} , км/с	V_{sc} , км/с
Гнейсы					
1	2	3	4	5	6
24653 ^г	Биотитовые гнейсы	7534.9	2.73	5.98	3.57
30102 ^б	Биотитовые гнейсы с эпидотом	8575.7	2.63	6.12	3.56
31406	Биотитовые гнейсы	8807.4	2.59	6.18	3.57
31489	Биотитовые гнейсы слабо мусковитизированные	8833.4	2.60	6.15	3.56
39965	Биотитовые гнейсы	10943.8	2.59	6.10	3.50
40069					
<i>Среднее</i>			2.66±0.10	6.10±0.07	3.56±0.03
Сланцы					
24864	Биотит-амфиболовые сланцы с эпидотом	7667.3	2.68	5.82	3.47
26996	Плагиоклаз-амфиболовые сланцы	8010.6	3.05	6.98	3.91
31225	Эпидот-кварц-биотит-плагиоклаз-амфиболовые сланцы	8755.2	3.04	6.52	3.82
37632-3	Эпидот-амфибол-плагиоклазовые сланцы	10136.2	2.75	6.46	3.53
41146	Амфибол-плагиоклаз-биотитовые сланцы	11323.8	2.91	6.12	3.47
41384-2	Эпидот-биотит-амфибол-плагиоклазовые сланцы	11387.1	2.91	6.12	3.47
<i>Среднее</i>			2.91±0.14	6.43±0.41	3.65±0.20
Амфиболиты					
1	2	3	4	5	6
24956	Амфиболиты со сфеном	7687.6	2.95	6.78	3.82
31094	Амфиболиты	8719.6	2.87	6.65	3.70
31918	Амфиболиты сланцеватые	8951.9	2.90	6.64	3.66
34847	Амфиболиты	9266.3	3.12	6.97	3.87
37414	Амфиболиты	10060.6	2.90	6.52	3.81
37445	Биотитовые амфиболиты	10079.0	3.10	6.73	3.77
<i>Среднее</i>			2.97±0.10	6.72±0.14	3.77±0.08

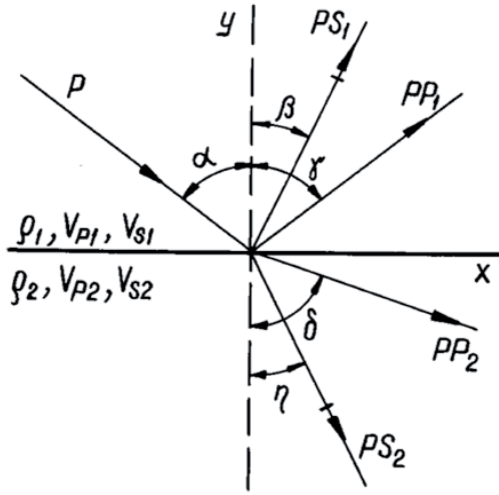


Рис. 2. Отражение и прохождение упругих волн на границе раздела твёрдых сред при падении луча продольных колебаний.

$$\begin{aligned}
 K_{PP1} &= \frac{A_{PP1}}{A_p} = 1 - \frac{2}{R_{p1}} [q(1-H-Mq)^2 + \sqrt{B-q}\sqrt{D-q}(1-Mq)^2 + H\sqrt{B-q}\sqrt{\Gamma-q}], \\
 K_{PS1} &= \frac{A_{PS1}}{A_p} = -\frac{2\sqrt{\Gamma q(1-q)}}{R_{p1}} [(1-H-Mq)(H+Mq) + M\sqrt{B-q}\sqrt{D-q}(1-Mq)], \\
 K_{PP2} &= \frac{A_{PP2}}{A_p} = \frac{2\sqrt{B(1-q)}}{R_{p1}} [\sqrt{\Gamma-q}(H+Mq) + \sqrt{D-q}(1-Mq)], \\
 K_{PS2} &= \frac{A_{PS2}}{A_p} = -\frac{2\sqrt{Dq(1-q)}}{R_{p1}} [1-H-M(q+\sqrt{B-q}\sqrt{\Gamma-q})].
 \end{aligned} \tag{2}$$

где

$$\begin{aligned}
 R_{p1} &= q(1-H-Mq)^2 + \sqrt{1-q}\sqrt{\Gamma-q}(H+Mq)^2 + \sqrt{B-q}\sqrt{D-q}(1-Mq)^2 + \\
 &+ H(\sqrt{1-q}\sqrt{D-q} + \sqrt{B-q}\sqrt{\Gamma-q}) + M^2q\sqrt{1-q}\sqrt{\Gamma-q}\sqrt{B-q}\sqrt{D-q}, \\
 M &= 2\left(\frac{1}{\Gamma} - \frac{H}{D}\right), \\
 q &= \sin^2 \alpha, B = \frac{V_{P1}^2}{V_{P2}^2}, \Gamma = \frac{V_{P1}^2}{V_{S1}^2}, D = \frac{V_{P1}^2}{V_{S2}^2}, H = \frac{\rho_2}{\rho_1}.
 \end{aligned}$$

Если наблюдается соотношение скоростей $V_{P2} > V_{P1}$, то при $\alpha > \alpha_{1cr} = \arcsin V_{P1}/V_{P2}$ продольная волна не проходит во вторую среду. Член $\sqrt{B-q}$, если $q > B$ становится мнимым. В этом случае вычисляются модули коэффициентов прохождения и отражения упругих волн,

$$Z = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{c^2 + d^2}}. \tag{3}$$

Для отраженной продольной волны:

$$\begin{aligned}
 a &= -q(1-H-Mq)^2 + \sqrt{1-q}\sqrt{\Gamma-q}(H+Mq)^2 + (H\sqrt{1-q}\sqrt{D-q}), \\
 b &= \sqrt{q-B}[M^2q\sqrt{1-q}\sqrt{\Gamma-q}\sqrt{D-q} - \sqrt{D-q}(1-Mq)^2 - H\sqrt{\Gamma-q}].
 \end{aligned} \tag{4}$$

Для отраженной поперечной:

$$\begin{aligned} a &= -2\sqrt{\Gamma q(1-q)}(1-H-Mq)(H+Mq), \\ b &= -2M\sqrt{\Gamma q(1-q)}\sqrt{q-B}\sqrt{D-q}(1-Mq). \end{aligned} \quad (5)$$

Для прошедшей поперечной:

$$\begin{aligned} a &= -2\sqrt{Dq(1-q)}(1-H-Mq), \\ b &= 2M\sqrt{Dq(1-q)}\sqrt{q-B}\sqrt{\Gamma-q}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для модулей перечисленных волн:

$$\begin{aligned} c &= q(1-H-Mq)^2 + \sqrt{1-q}\sqrt{\Gamma-q}(H+Mq)^2 + H\sqrt{1-q}\sqrt{D-q}, \\ d &= \sqrt{q-B}[\sqrt{D-q}(1-Mq)^2 + H\sqrt{\Gamma-q} + M^2q\sqrt{1-q}\sqrt{\Gamma-q}\sqrt{D-q}]. \end{aligned} \quad (7)$$

Графики изменений коэффициентов отражения продольной K_{PP1} , E_{PP1} , отраженной поперечной K_{PS1} , E_{PS1} , проходящей продольной K_{PP2} , E_{PP2} , и проходящей поперечной волн K_{PS2} , E_{PS2} , рассчитанные по средним скоростям гнейсов ($\rho_C = 2.66$ г/см³, $V_{PC} = 6.10$ км/с, $V_{SC} = 3.56$ км/с), сланцев ($\rho_C = 2.91$ г/см³, $V_{PC} = 6.43$ км/с, $V_{SC} = 3.65$ км/с) и амфиболитов ($\rho_C = 2.97$ г/см³, $V_{PC} = 6.72$ км/с, $V_{SC} = 3.77$ км/с) представлены на рис. 3-8.

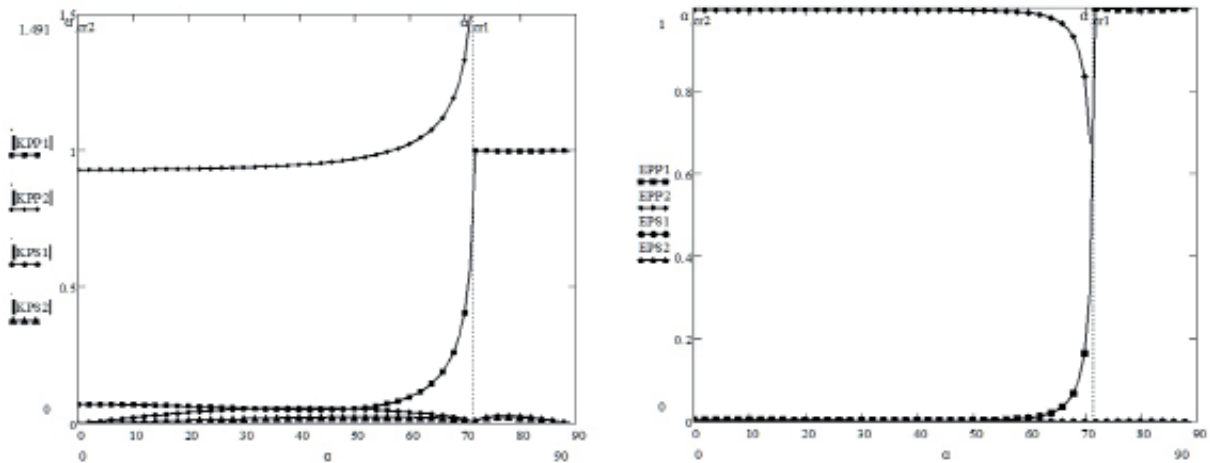


Рис. 3. Гнейсы-сланцы-. Падение продольной волны из гнейса.

Согласно расчетам, на контакте гнейса и сланца (рис. 3), при прямом падении на границу раздела продольная волна проходит с коэффициентом $K_{PP2} = 0.943$ во вторую среду. Эта величина выдерживается до углов падения 50-60°. Затем при росте угла падения она резко возрастает до критического угла для проходящей продольной волны, $\alpha_{PP2} = 71.62^\circ$. Если принять во внимание диапазон единичных величин скоростей в гнейсах и сланцах, интервал критического угла α_{PP2} при контакте гнейса и сланцев занимает 59-90°. При прямом падении волны коэффициент $K_{PP1} = 0.071$.

Затем он в диапазоне углов 50-60° начинает расти и к критическому углу достигает значения единицы. После критического угла, за исключением небольшой доли энергии, приходящейся на проходящую и отражённую попе-

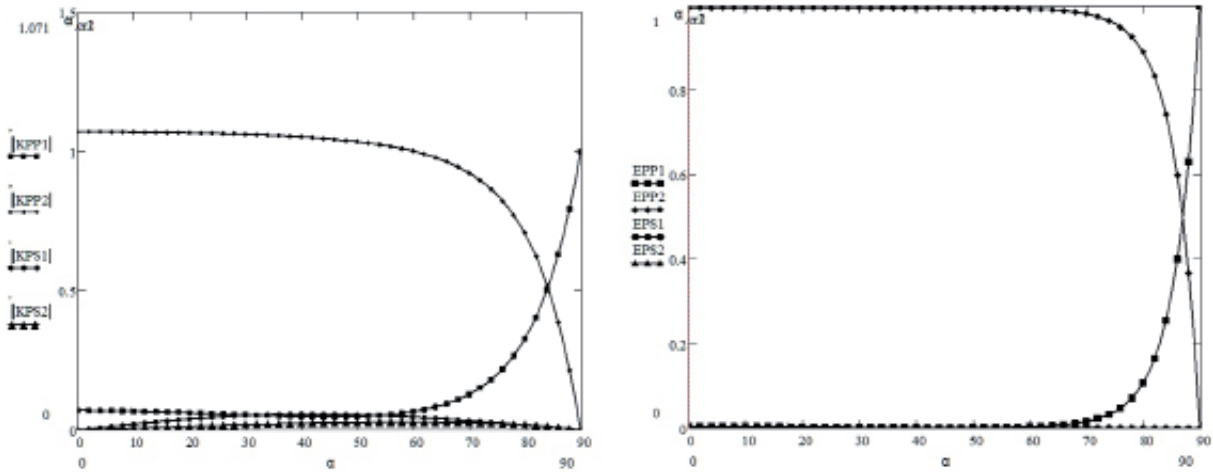


Рис. 4. Сланцы-Гнейсы. Падение продольной волны из сланца.

речную волну, K_{PP1} примерно равен единице. После этой величины начинается резкое падение величины коэффициента K_{PP2} . Заметной трансформации падающей продольной волны в поперечную проходящую PS_2 и отраженную PS_1 не наблюдается. При прямом падении волны, $K_{PS1} = K_{PS2} = 0$. Коэффициенты K_{PS1} , K_{PS2} приобретают наибольшие значения при углах падения, равных $\sim 45^\circ$. При этом значении угла $K_{PS1} = 0.057$, $K_{PS2} = -0.024$. Судя по графику, рис. 3, энергия отражённой продольной волны близка к нулю вплоть до угла $\sim 60^\circ$. Энергия отраженной волны после критического угла примерно равна единице. Энергия поперечной проходящей PS_2 и отраженной PS_1 волны близка к нулю во всём диапазоне углов падения.

На контакте сланца и гнейса (рис. 4), продольная волна почти с той же амплитудой проходит во вторую среду. При прямом падении волны на границу раздела коэффициент $K_{PP2} = 1.071$. Затем он незначительно понижается до угла $\sim 65^\circ$. После этой величины начинается резкое падение величины коэффициента K_{PP2} . Коэффициент отражения продольной волны K_{PP1} составляет незначительную долю от K_{PP2} . При прямом падении волны на границу раздела эта доля составляет $K_{PP1} = -0.071$.

Рост коэффициента K_{PP1} начинается также с угла $\sim 65^\circ$. Таким образом при падении волны на границу раздела сред «сланцы-гнейсы» заметное отражение будет наблюдаться при углах падения $\sim 65-90^\circ$. Заметной трансформации падающей продольной волны в поперечную проходящую PS_2 и отраженную PS_1 не происходит. При прямом падении волны, $K_{PS1} = K_{PS2} = 0$. Наибольшие значения коэффициенты K_{PS1} , K_{PS2} приобретают при углах падения, равных $\sim 45^\circ$. При этом значении угла $K_{PS1} = -0.059$, $K_{PS2} = 0.027$. Энергия отражённой продольной волны близка к нулю вплоть до угла $\sim 75^\circ$. Энергия поперечной проходящей PS_2 и отраженной PS_1 волны близка к нулю во всём диапазоне углов падения.

Поведение коэффициентов K_{PP1} , K_{PP2} , K_{PS1} , K_{PS2} при падении луча из гнейсов в амфиболиты сходно наблюдаемому на контакте гнейсы-сланцы. При контакте гнейса и амфиболита (рис. 5), при прямом падении на грани-

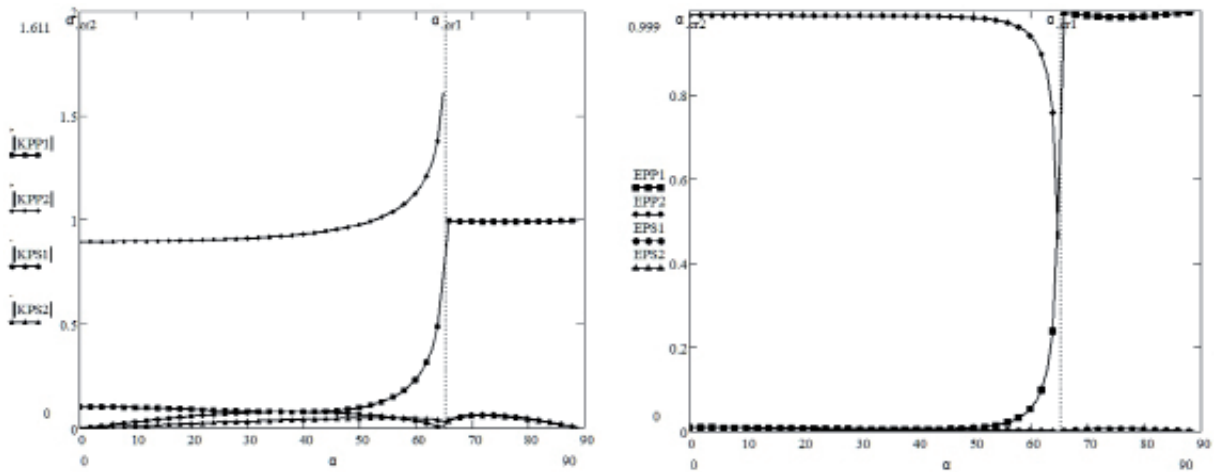


Рис. 5. Гнейсы-амфиболиты. Падение продольной волны из гнейса.

цу раздела во вторую среду, продольная волна проходит с коэффициентом $K_{PP2} = 0.926$, у продольной отражённой $K_{PP1} = 0.079$. Здесь критический угол для проходящей продольной волны, $\alpha_{PP2} = 65.2^\circ$. С учетом того, что диапазон единичных величин скоростей в гнейсах и амфиболитах составляет $V_{Гн} = 5.98-6.18$ км/с и $V_{Рам} = 6.52-6.97$ км/с, $\alpha_{PP2} = 59-71^\circ$.

После критического угла K_{PP1} примерно равен единице, то есть практически вся энергия переходит в отражённую продольную волну. Амплитуда и энергия поперечных проходящей PS_2 и отраженной PS_1 волн занимают малую долю и аналогичны наблюдаемым на границе гнейсов и сланцев.

При падении волны из амфиболитов в гнейсы, рис. 6, критического угла для прошедшей продольной волны не наблюдается. При прямом падении на границу раздела продольная волна проходит с коэффициентом $K_{PP2} = 1.077$, отраженная с $K_{PP1} = -0.076$. Падение величины коэффициента проходящей продольной волны происходит плавно, начиная с угла $\sim 50^\circ$. При 90° $K_{PP2} = 0$. Коэффициент K_{PP1} отражённой продольной волны заметно возрастает от $\sim 70^\circ$ и достигает единицы при 90° . Наибольшие значения коэффициенты K_{PS1} , K_{PS2} приобретают при углах падения, равных $\sim 40-60^\circ$. При этом значе-

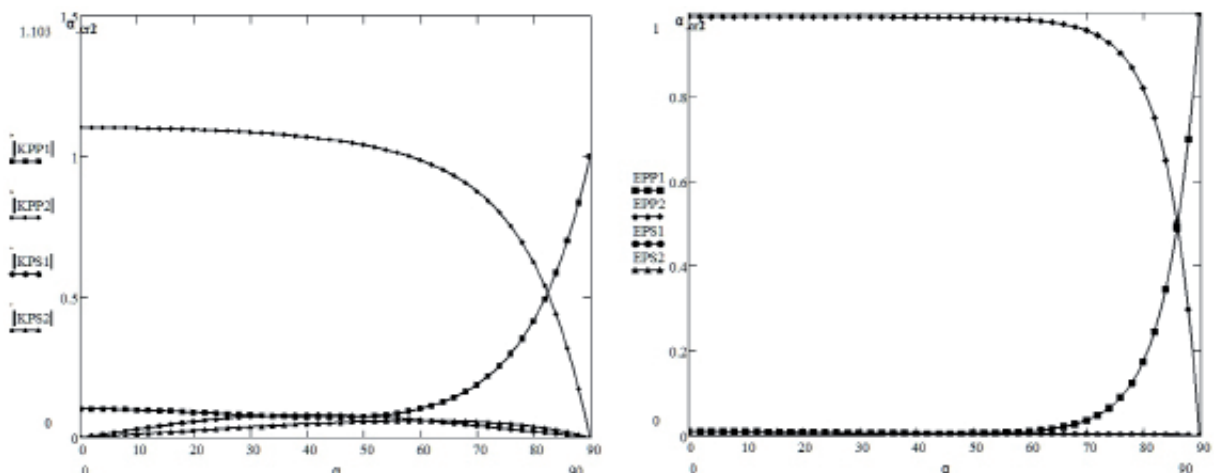


Рис. 6. Амфиболиты-гнейсы. Падение продольной волны из амфиболита.

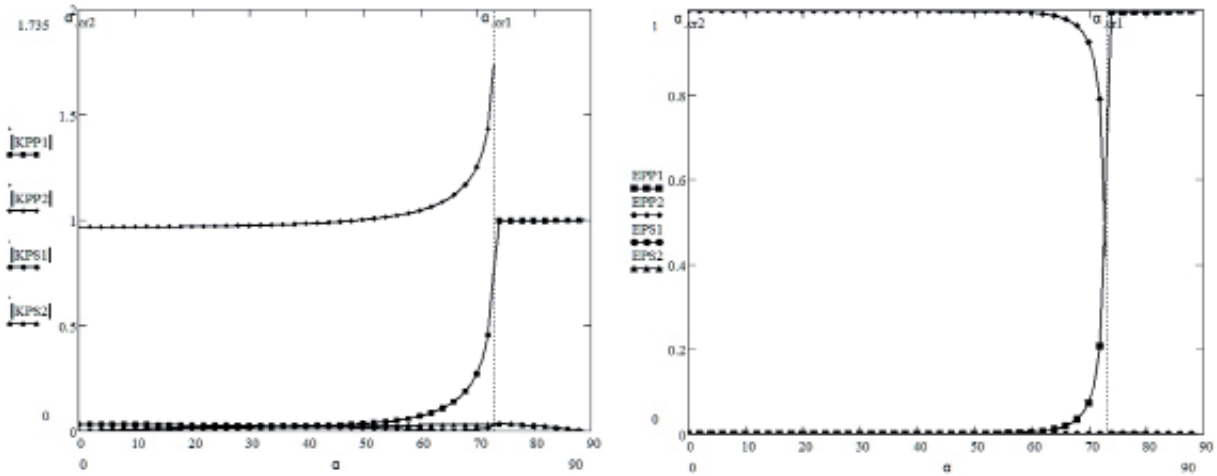


Рис. 7. Сланцы-амфиболиты. Падение продольной волны из сланца.

нии угла $K_{PS1} = -0.082$, $K_{PS2} = 0.062$. Вариации единичных значений свойств контактирующих амфиболитов-гнейсов сравнительно мало влияют на коэффициенты по амплитуде и энергии.

Согласно средним данным, при падении продольной волны из сланца в слой амфиболита, рис. 7, наблюдается критический угол для проходящей продольной волны, $\alpha_{PP2} = 73.1^\circ$. Поскольку единичные величины скоростей в сланцах и амфиболитах находятся в рамках $V_{Pсл} = 5.82-6.98$ км/с и $V_{Pам} = 6.52-6.97$ км/с, диапазон изменений критического угла могут составлять $\alpha_{PP2} = 57-90^\circ$.

При прямом падении на границу раздела продольная волна проходит с коэффициентом $K_{PP2} = 1.027$, отраженная с $K_{PP1} = 0.055$. Коэффициент отражённой волны очень быстро растет при приближении к критическому углу, достигая за этим углом значение единицы. Также как и в предыдущих случаях, амплитуда и энергия поперечной проходящей PS_2 и отраженной PS_1 волны близка к нулю во всём диапазоне углов падения.

При падении волны в сланцы из амфиболитов, рис 8, как из среды, обладающей более высокими скоростными характеристиками, критического

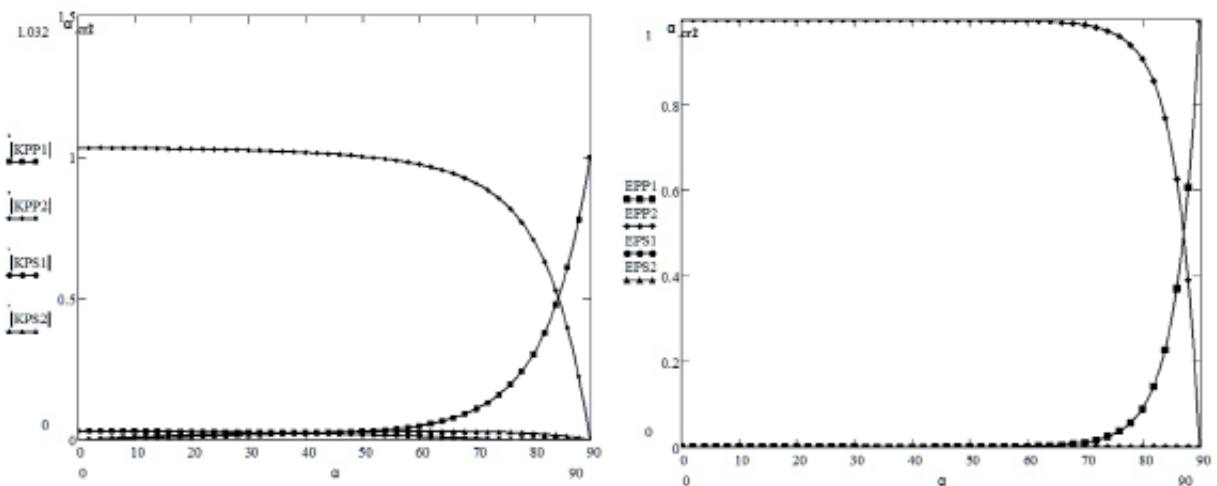


Рис. 8. Амфиболиты-сланцы. Падение продольной волны из амфиболита.

угла для прошедшей продольной волны не наблюдается. При прямом падении на границу раздела продольная волна проходит с коэффициентом $K_{PP2} = 1.032$, отраженная с $K_{PP1} = -0.032$. Падение величины коэффициента проходящей продольной волны наблюдается начиная с угла $\sim 70^\circ$. При 90° $K_{PP2} = 0$. Коэффициент K_{PP1} отражённой продольной волны заметно возрастает тоже от $\sim 70^\circ$, достигая единицы при 90° . Коэффициенты K_{PS1} , K_{PS2} не превышают значений 0.03 во всём диапазоне углов. Вариации единичных значений свойств контактирующих амфиболитов-сланцев сравнительно мало влияют на коэффициенты по амплитуде и энергии.

Заключение

Выполнена оценка сейсмоконтрастности контактов некоторых пород, залегающих по разрезу Кольской сверхглубокой скважины. В преобладающем диапазоне углов энергия падающей продольной волны, в основном, переходит в проходящую продольную волну второй среды. Если величина скорости продольной волны в первой среде меньше, чем скорость продольной волны во второй среде, возникает критический угол для продольной волны, проходящей во вторую среду. Без наличия критического угла заметная доля отражённой продольной волны наблюдается при углах, превышающих $\sim 70^\circ$. При угле 90° по амплитуде она равна падающей. При наличии критического угла амплитуда отражённой продольной волны примерно равна падающей, за исключением малой доли энергии, преобразованной в поперечные волны. Для средних значений скорости гнейсов и сланцев критический угол составляет $\sim 72^\circ$, для сланцев-амфиболитов, - $\sim 73^\circ$, для гнейсов-амфиболитов, - $\sim 65^\circ$. Наличие критического угла расширяет диапазон углов падения при которых наблюдается значительная амплитуда отражённой волны. Например, на границе раздела гнейсы-амфиболиты заметная отражённая волна регистрируется углах, свыше $\sim 60^\circ$. Из этого следует вывод, что наиболее эффективное зондирование слоистых пород по фактору отраженной продольной волны следует проводить при углах падения, превышающих 60° .

Примечательно, что сейсмоконтрастность границ по отражённой волне существенно выше при падении волны из гнейсов в амфиболиты, чем наоборот. Такое же наблюдается на границах гнейсов-сланцев и сланцев-амфиболитов. Доля преобразования энергии падающей волны в проходящую поперечную и поперечную отраженную волны очень мала. Она не превышает десятой доли от энергии падающей волны во всём диапазоне углов падения.

Авторы выражают искреннюю признательность П.К. Скуфьину за петрографическое описание пород и полезные консультации. Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №№ 13-05-00125-а, 16-05-00026-а.

Список литературы

1. Беликов Б.П., Александров К.С., Рыжова Т.В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. М.: Наука. 1970. 276 с.
2. Головатая О.С., Горбачевич Ф.Ф., Керн Х., Попп Т. Свойства некоторых пород из разреза Кольской сверхглубокой скважины при изменении РТ – параметров // Физика Земли. № 8. 2006. С. 1-12.
3. Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины / Под ред. Козловского Е.А. / М: Недра. 1984. 490 с.
4. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследования / Под ред. Орлова В.П. и Лаверова Н.П. / М: Технонефтегаз. 1998. 260 с.
5. Сейсмогеологическая модель литосферы северной Европы. Лапландско-Печенгский район. Ред. Н.В. Шаров. Апатиты: изд-во КНЦ РАН. 1997. 226 с.
6. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. М.: Недра, 1975. 279 с.
7. Christensen, N. and Mooney, W. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. J. of Geophys. Res. 1995. 100 (B7). P. 9761-9788.
8. Emmermann R. and J. Lauterjning, 1997. The German Continental Deep Drilling Program KTB: Overview and major results. J. Geophys. Res. 102 (B8), P. 18179-18201.
9. Felix F. Gorbatsevich. Reflection and refraction of elastic waves at the interface. Salt Lake City, Miami. American Academic Press, 2016. 161 p.
10. Kern H., Popp T., Gorbatsevich F., Zharikov A., Lobanov K.V. and Smirnov Yu.P. Pressure and temperature dependence of Vp and Vs in rocks from the super-deep well and from surface analogues at Kola and the nature of velocity anisotropy // Tectonophysics. 2001. V. 338. P. 113-134.
11. Kern, H., K. Mengel, K. W. Strauss, T. I. Ivankina, A. N. Nikitin, and I. T. Kukkonen. Elastic wave velocities, chemistry and modal mineralogy of crustal rocks sampled by the Outokumpu scientific drill hole: Evidence from lab measurements and modeling: Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2009. V. 175. P. 151-166.
12. Kretz R. Symbols for rock-forming minerals // Amer. Mineral. 1983. V. 68. P. 277-279.