Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1984, т. 101

УДК [550.832 + 550.834.5] : 553.48'43(470.21)

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ПЕЧЕНГСКОМ РУДНОМ ПОЛЕ

М.Д.ЛИЗИНСКИЙ, С.Г.ПОСПЕЛОВ, В.Г.ТЕРЕНТЬЕВ,
Т.Л.ПИСАКИНА, М.Ю.ПАНЕНКОВА, В.П.СИНЕЛЬНИКОВ

В Печенгском рудном поле с целью уточнения его структур в околоскважинном и межскважинном пространстве проводятся сейсмоакустические исследования, включающие в себя вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП) и акустический каротаж (АК). При их обработке дополнительно привлекаются данные ГГК-П. Наблюдения АК выполняются с помощью разработанного во ВНИИГИС макета аппаратуры Парус-4, обеспечивающего регистрацию кинематических и динамических параметров первых волн, а также запись волнограмм и фазокорреляционных диаграмм.

Всего методом АК исследовано 15 скважин глубиной от 400 до 1900 м, расположенных на различных участках рудного поля. Изучались скважины, пробуренные с полным отбором керна. Это позволило надежно идентифицировать выделенные по данным акустического каротажа интервалы разрезов скважин. Можно рассчитывать, что в дальнейшем при детализационных исследованиях будут также представительно охарактеризованы по данным акустического каротажа и маломощные (до 0,2-0,6 м) рудные интервалы.

Основой классификации пород разреза по данным акустического каротажа явились результаты статистического анализа этих данных (см. таблицу и рис.1). Породы, слагающие разрез рудного поля, делятся на шесть классов.

Обобщенная характеристика упругих свойств пород Печенгского рудного поля

Породы	Объем выборки, м	Диапазон изменения v, км/с	Среднее значение v, км/с	Среднее квадратическое отклонение, км/с	Коэффициент вариации, %	v_p/v_s
Филлиты, алевролиты, песчаники	1566 541	5,0-6,4 2,7-3,7	5,8 3,3	0,25 0,17	4,3 5,1	1,76
Туфогенные	411 208	5,4-6,6 2,9-3,9	6,0 3,4	0,24 0,21	4,0 6,2	1,76
Перидотиты	290 202	5,0-6,2 2,5-3,5	5,6 3,1	0,23 0,20	4,2 6,4	1,81
Диабазы	1291 263	5,8-7,8 2,9-4,1	6,8 3,6	0,41 0,22	6,2 6,0	1,83
Габбро-диабазы	583 368	6,0-7,0 3,5-3,9	6,4 3,5	0,24 0,16	3,7 4,6	1,83
Пироксениты	186 144	6,2-7,4 3,3-4,1	6,9 3,8	0,26 0,14	3,8 3,6	1,81

Примечание. В числителе - данные о продольных волнах, в знаменателе - о поперечных.

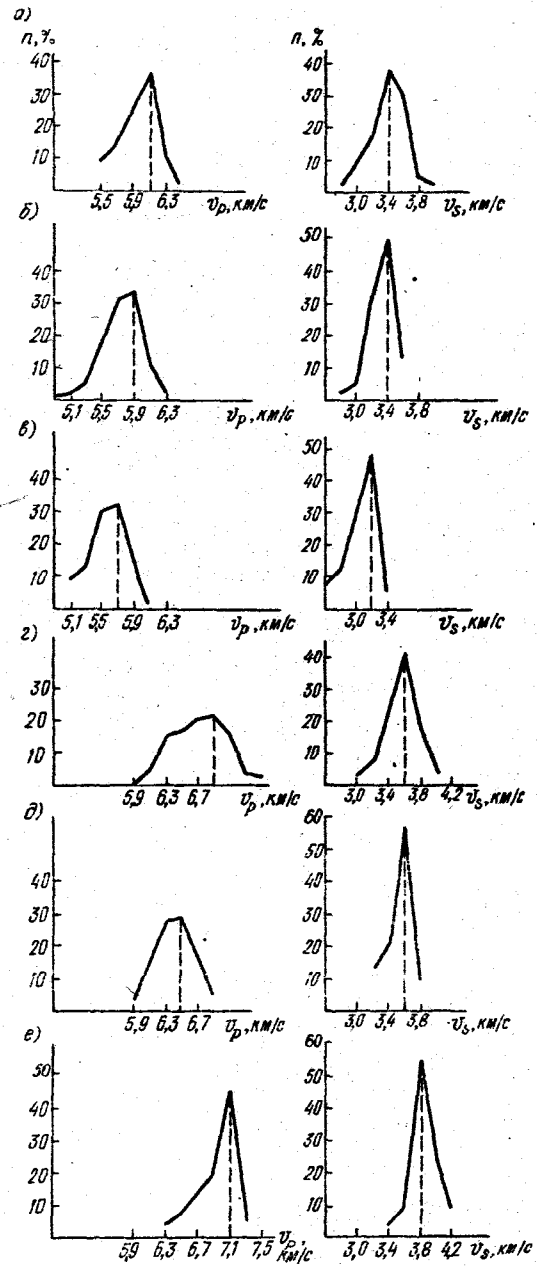


Рис.1. Распределения и скорости продольных и поперечных волн в породах Печенгского рудного поля: а – туфогенные породы; б – филлиты, алевролиты, песчаники; в – перидотиты; г – диабазы; д – габбро-диабазы; е – пироксениты

Все представленные распределения по оценочным критериям (показатели асимметрии и эксцесса, сравнение эмпирического и теоретического распределений) не противоречат нормальному закону. Поэтому средние значения v_p и v_s всех шести классов сравнивались между собой по критерию Стьюдента. Оказалось, что классы пород различаются по средним значениям v_p с надежностью вывода 0,95. Сравнение полученной классификации с существующей свидетельствует о том, что геологическая эффективность акустического каротажа при расчленении разрезов скважин в Печенгском рудном поле сопоставима с эффективностью применяемого здесь комплекса каротажных методов.

Комплексное применение АК, ГГК-П и ВСП открыло новые возможности для изучения околоскважинного пространства.

ВСП совместно с наземными сейсмическими наблюдениями методом отраженных волн (МОВ) используется в течение ряда лет для изучения структуры Печенгского рудного поля по отражающим границам, связанным с контактами дифференцированных массивов основных и ультраосновных пород, подошвой продуктивной толщи и другими границами [3, 4]. Одной из ва

нейших задач, решаемых ВСП в этом комплексе, является геологическая привязка отраженных волн, прослеженных по данным МОВ.

Для объяснения физической и геологической природы отражений может быть использовано моделирование волнового поля ВСП с помощью синтетических сейсмограмм. Согласованность теоретического и реального волнового поля служит основанием для выделения на исходном детальном сейсмоакустическом (скоростном и плотностном) разрезе участков, на которых образованы отраженные волны.

Для изучения природы отражений на Печенгском рудном поле использованы алгоритм [1] и программа Н.Е.Гриня. По программе рассчитывалась интенсивность однократных отраженных волн по вертикальному профилю для горизонтально-слоистого разреза с учетом геометрического расхождения волнового фронта источника.

Реальные условия ВСП на рудном поле (непродольные годографы и моноклинальная структура) отличаются от модели, для которой составлена программа. Но для слабо дифференцированных по скорости и плотности сред, к которым относятся разрезы Печенгского рудного поля, коэффициенты отражения, обычно не превышающие 0,05-0,06, крайне мало зависят от угла падения в докритической области [2]. Вместе с тем при наблюдениях ВСП на рудном поле углы падения лучей на отражающие границы (до 40-50°), как правило, не достигают критических (60° и более).

При расчете синтетических сейсмограмм исходный сейсмоакустический разрез задавался по данным АК и ГГК-П. При этом для учета реальных непродольных систем наблюдений верхняя часть разреза скважины удлинялась на расстояние от пункта взрыва до устья скважины. Скорость и плотность в этой части разреза принимались постоянными. В результате такого искусственного удлинения разреза скважины удалось эффективно моделировать геометрическое расхождение.

Форма импульса прямой волны определялась по записям ВСП. Как показал анализ большого фактического материала, форма записи прямой волны обычно выдерживается для многих скважин и пунктов взрыва. В соответствии с видимой частотой импульса шаг квантования скоростного разреза выбирался равным 2 мс. По скоростному и плотностному разрезам вычислялись коэффициенты отражения, затем импульсная сейсмограмма и ее свертка с падающим импульсом - синтетическая сейсмограмма, которая представлялась в форме зависимости амплитуды отраженного сигнала от вертикальной координаты точки формирования волны.

Использование синтетической сейсмограммы для изучения природы отраженных волн покажем на примере одной из скважин Печенгского рудного поля, на которой выполнен комплекс сейсмоакустических наблюдений: АК, ВСП, ГГК-П. Через устье скважины проведен также наземный профиль МОВ, причем наблюдения МОВ и ВСП выполнены из общих пунктов взрыва. Скважина характеризуется типичным для рудного поля разрезом. Она пересекла надпродуктивную вулканогенную толщу, представленную авгитовыми диабазами, шаровыми лавами и прослоями туфов, и часть разреза продуктивной толщи, которая сложена

120744

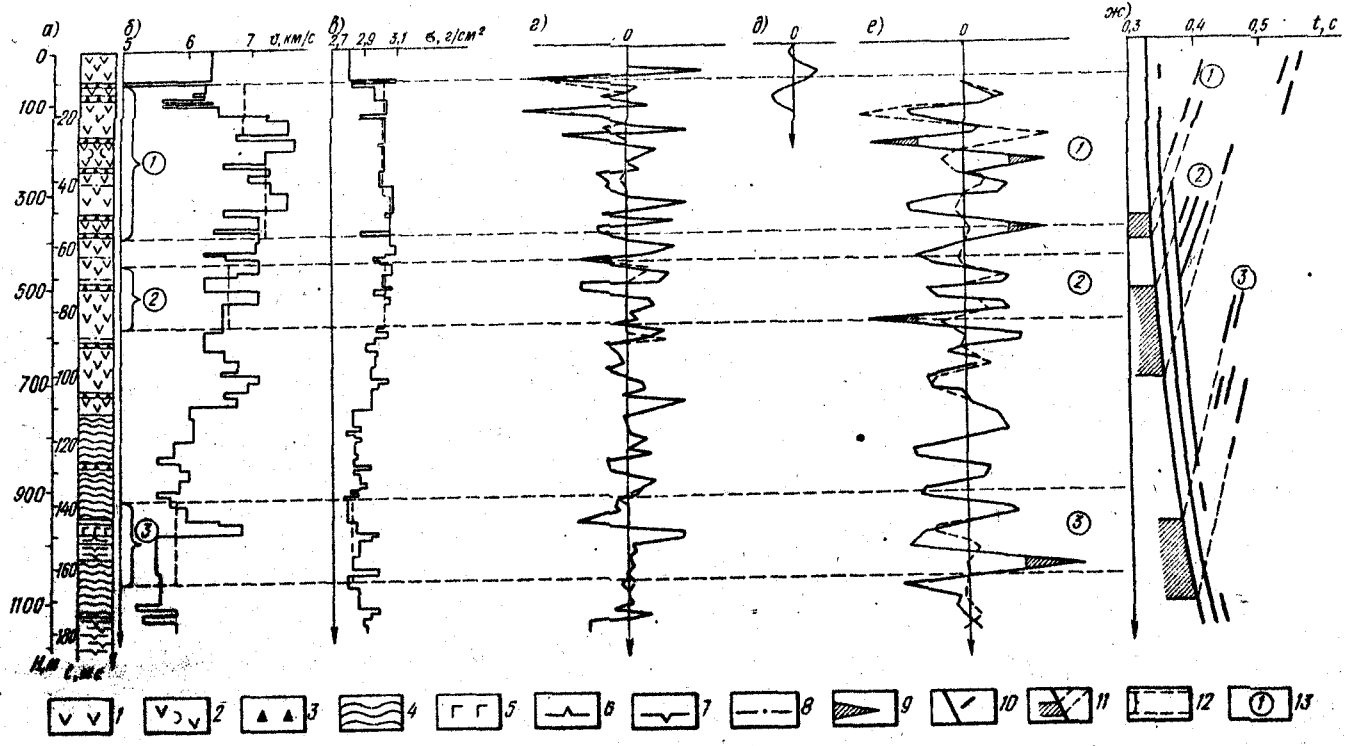


Рис.2. Привязка отраженных волн к разрезу скважины по **сейсмоакустическим** данным: а – схематизированная геологическая колонка; б – скоростной разрез по данным АК; в – плотностной разрез по данным ГГК-Д; г – импульсные сейсмограммы; д – падающий импульс; е – синтетические сейсмограммы; ж – годографы ВСП (пунктиром на графиках б, в, г и е отмечен упрощенный разрез)

1 – диабазы; 2 – шаровые лавы; 3 – туфогенные породы; 4 – филлиты, алевролиты, песчаники; 5 – габбро; 6 – пироксениты; 7 – перидотиты; 8 – зоны интенсивной трещиноватости и дробления; 9 – повышенные значения амплитуд отраженных сигналов; 10 – фазовые годографы прямых и отраженных волн; 11 – привязка отраженных волн по фазовым годографам; 12 – участки разреза, формирующие отраженные волны; 13 – индексы отраженных волн и соответствующих участков разреза

в основном метаморфизованными осадочными породами и вмещают два массива основных и ультраосновных пород (рис.2). Такие массивы представляют собой основной объект поисковых работ, поскольку именно с ними связаны медно-никелевые руды.

Синтетическая сейсмограмма для этой скважины сопоставлена с реальным волновым полем. Прослеженные на ВСП три отраженные волны привязаны к колонке скважины по пересечению их годографов с первой фазой прямой волны.

Привязка волны I, прослеженной по двум фазам, полностью согласуется с колебанием повышенной амплитуды синтетической сейсмограммы. В то же время выше по разрезу (до глубины 0,25 км) на этой сейсмограмме регистрируется двухфазная интенсивная волна, которая не прослеживается в поле ВСП. Несоответствие волновых полей в этой части разреза, по-видимому, объясняется ее повышенными поглощающими свойствами, не учитываемыми при расчете синтетической сейсмограммы за недостатком объективной исходной информации.

Привязке многофазных волн 2 и 3 ВСП соответствуют на синтетической сейсмограмме однофазные колебания повышенной амплитуды, приуроченные к верхним границам участков привязки. Из этого может следовать предположение, что на ВСП каждое из многофазных колебаний представлено одной волной, но импульс имеет большую, чем принятая для расчетов, длительность из-за наложения волны-спутника. Такое изменение формы падающего импульса может быть локальным, т.е. проявляться на отдельных участках ВСП.

С учетом рассмотренных особенностей волновых полей синтетическую сейсмограмму можно считать приемлемой моделью для ВСП.

По теоретическому полю определялись участки исходного сейсмоакустического разреза, на которых сформировались три отражения повышенной над фоном интенсивности. Как следует из механизма свертки, каждый такой участок включает интервал регистрации рассматриваемых высоких амплитуд и вышележащую область разреза, соответствующую длительности падающего импульса.

С участками привязки реальных годографов отражений сопоставлялись времена регистрации амплитуд синтетической сейсмограммы, превышающих фон в полтора-два раза. В соответствии с таким подходом выделились три следующих участка формирования интенсивных отражений:

Номер участка	1	2	3
Привязка годографов ВСП, мс	56-64	80-109	152-180
Интервал прослеживания колебаний повышенной интенсивности на синтетической сейсмограмме, мс	30-58	84-88	160-164
Интервал формирования отраженной волны, мс	10-58	64-88	140-164

Для иллюстрации влияния сейсмоакустической структуры каждого из выделенных участков разреза на волновое поле исходный разрез моделировался следующим образом. Структура участков 2 и 3 заменялась постоянными значениями скорости и плотности, осредняющими исходные разрезы, а участок I представлялся двуслойными разрезами скорости и плотности в соответствии с особенностями исходных данных. Упрощенный разрез вновь проходил все после-

довательные преобразования до построения соответствующей синтетической сейсмограммы.

В результате упрощений получены новые импульсная и синтетическая сейсмограммы. На импульсной сейсмограмме (рис.2,г) участки упрощения разреза характеризуются в основном нулевыми значениями. Импульсная сейсмограмма между участками упрощения практически не отличается от исходной.

На синтетической сейсмограмме, построенной по упрощенному разрезу (рис.2,е), основные отличия от исходной заключены в пределах участков упрощения разреза. Главным результатом является почти повсеместное падение интенсивности отраженного сигнала от аномальных до фоновых значений за исключением верхней части разреза, где повышенные амплитуды свертки сформировались на новой структуре (10-16 мс), возникшей в результате моделирования. Полученное преобразование исходной сейсмограммы является визуальным подтверждением правильности определения участков разреза, формирующих интенсивные отраженные волны.

Моделирование сейсмоакустического разреза позволяет рассмотреть структуры, формирующие интенсивные отражения, и выявить их геологическую природу. Основным фактором, определяющим повышенную амплитуду отраженной волны на синтетической сейсмограмме, является соответствие (синфазность или противофазность) формы импульсной сейсмограммы и падающего импульса. Такое соответствие при свертке обоих сигналов дает максимальный эффект.

Видимый период падающего импульса составляет 14 мс, и соответствующая ему форма импульсной сейсмограммы определяется коэффициентом отражения, меняющими знак через 7 мс. Именно такая структура наиболее благоприятна для формирования интенсивных волн. Ей соответствует слоистый разрез, в котором коэффициенты отражения изменяют знак через 40-50 м (для скорости 6-7 км/с), хотя внутри этих интервалов могут не оставаться постоянными. Наиболее благоприятно для формирования интенсивных отражений следование друг за другом двух интервалов указанной мощности в соответствии с двумя интенсивными экстремумами падающего импульса. Большее число интервалов будет ухудшать разрешенность записи.

Сейсмоакустические структуры, формирующие интенсивные отражения на трех участках разреза рассматриваемой скважины, характеризуются в основном согласованными по знаку изменениями скорости и плотности либо изменением одного из параметров при сохранении другого. На участках 1 и 2, расположенных в пределах надпродуктивной вулканогенной толщи, благоприятная для интенсивных отражений периодичность графика коэффициентов отражения и импульсной сейсмограммы создается за счет интервалов пониженной скорости и плотности, представленных прослоями туфов и зонами повышенной трещиноватости и дробления среди высокоскоростных и плотных диабазов.

На участке 3, относящемся к продуктивной толще, благоприятная сейсмоакустическая структура формируется интрузивным массивом, дифференцированным от габбро до перидотитов, и вмещающими его осадочными породами. В пределах массива максимальные скорость и плотность отмечаются у пироксенитов, а донная его часть, представленная серпентинизированными перидотитами, характе-

ризуется пониженной скоростью и плотностью, причем скорость еще ниже, чем во вмещающих осадочных породах. Необходимая периодичность структуры обеспечена как мощностью отдельных фаций массива, так и сейсмоакустическим разрезом вмещающих осадков.

Таким образом, как показывает рассмотренный типичный разрез, геологическая природа отражений в надпродуктивной вулканогенной толще - периодическое появление в разрезе диабазов и шаровых лав туфогенного материала, а также зон трещиноватости и дробления. В продуктивной толще отражение сформировано на массиве основных и ультраосновных пород и вмещающих его осадках.

Мощность участка разреза, на котором формируется отражение, формально определяется по длительности падающего импульса и интервалу повышенных амплитуд на синтетической сейсмограмме. Для одиночного значения аномалии амплитуды отражения эта мощность минимальна и строго соответствует длительности импульса. Для импульса, определенного по данным ВСП на Печенгском рудном поле (20 мс), минимальная протяженность интервала привязки составляет 120-140 м (при скорости 6-7 км/с).

Однако, как показывает анализ, основной вклад в интенсивность отраженного сигнала вносят именно те сейсмоакустические структуры, на которых график коэффициента отражения по периодичности согласуется с падающим импульсом, имеющим длину полуволны около 40 м.

Привязка к разрезам скважин отраженных волн, прослеженных при ВСП, с помощью комплексного применения сейсмоакустических методов повышает геологическую эффективность изучения околоскважинного пространства на рудном поле. При этом роль отдельных методов представляется следующим образом. Сейсмический комплекс МОВ и ВСП обеспечивает решение структурно-геологических задач путем изучения глубинного строения продуктивной и надпродуктивной толщ по отражающим границам в интервале разреза, представляющем интерес для поисковых работ. Но этот комплекс не позволяет обеспечить строгую геологическую привязку отраженных волн. На помощь ему приходят скважинные сейсмоакустические методы: АК и ГГК-П. Их совместное с ВСП применение, как следует из рассмотренного выше примера, решает важнейшую задачу привязки отражений.

Результаты применения такого широкого комплекса скважинных и наземных сейсмоакустических исследований иллюстрирует один из разрезов, изученных на Печенгском рудном поле (рис.3). Разрез включает упомянутую выше скважину. По данным МОВ в нем прослежены отражающие границы. Одна из этих границ по комбинированным системам наблюдений прослежена и на ВСП. Ее привязка к геологической колонке скважины соответствует участку 3 (см. рис.2), т.е. дифференцированному интрузиву и вмещающим его осадочным породам.

При изучении сейсмогеологического разреза ВСП сыграло роль не только в привязке отражений, прослеженных по наземному профилю, но имело и самостоятельное структурное значение. По годографам ВСП из пункта взрыва, смещенного от скважины по восстанию пород, отражающая граница, связанная с массивом, была прослежена к северу от скважины на расстояние до 0,4 км.

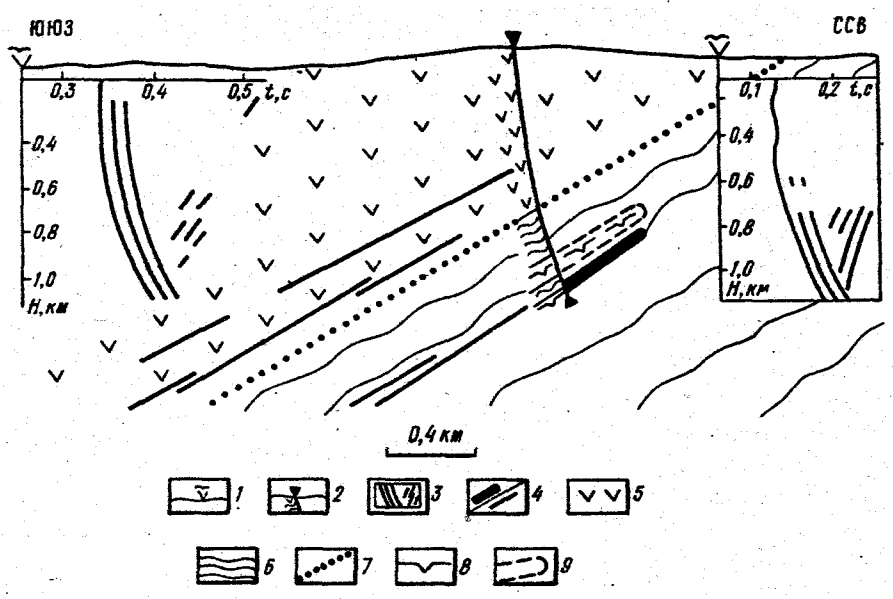


Рис.3. Результаты изучения околоскважинного пространства по данным сейсмоакустики

1 – сейсмический профиль МОВ и пункты взрыва комбинированных наблюдений МОВ и ВСП; 2 – скважина ВСП и ее схематизированная геологическая колонка; 3 – фазовые годографы прямой и отраженной волн по данным ВСП; 4 – отражающие площадки по данным ВСП (а), МОВ (б); 5 – вулканогенная толща; 6 – продуктивная толща; 7 – контакт продуктивной и вулканогенной толщ по сейсмическим и геологическим данным; 8 – дифференцированные массивы основных и ультраосновных пород; 9 – область прослеживания массива по сейсмоакустическим данным

На большем удалении границы не существует, о чем однозначно свидетельствуют фазовые годографы отражения (см. рис.3): оси синфазности не прослеживаются выше 0,7 км. Причина этого может быть только геологическая: обрыв границы, поскольку волн-помех, интерферирующих с отражением, не наблюдается.

ВЫВОДЫ

I. По эффективности расчленения геологического разреза данные АК сопоставимы с комплексом применяемых на Печенгском рудном поле пяти других методов ГИС.

2. Синтетические сейсмограммы, построенные по данным АК и ГГК-П, согласуются с волновыми полями ВСП.

3. Интенсивные отраженные волны на Печенгском рудном поле образуются на участках разреза мощностью, равной длине полуволны падающего импульса, т.е. 40-50 м, на которых коэффициент отражения сохраняет знак. Если два таких участка следуют друг за другом и на их границе знак коэффициента отражения меняется, интенсивность отражений растет. Увеличение числа таких последовательных интервалов в разрезе приводит к неразрешенной сейсмической записи.

4. Геологическая природа отражений, формирующихся в разрезе надпродуктивной вулканогенной толщи, определяется чередованием высокоскоростных и плотных эффузивов с туфогенными пачками и зонами трещиноватости и дробления, характеризующимися пониженными значениями упругих параметров. В продуктивной толще интенсивные отражения установлены для дифференцированных интрузивов, содержащих высокоскоростные габбро и пироксениты. На сильнометаморфизованных апоперидотитовых и апооливинитовых массивах интенсивные отражения могут не образовываться.

5. Комплексное применение сейсмоакустических методов позволяет решать как структурные задачи изучения Печенгского рудного поля по отражающим границам, так и привязывать эти границы к геологическому разрезу. Благодаря этому может быть обеспечено эффективное изучение околоскважинного пространства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гринь Н.Е. Исследование структуры среды по динамике сейсмических волн. Киев, Наукова думка, 1979.

2. Епинатьева А.М. Физические основы сейсмических методов разведки. М., Изд-во МГУ, 1970.

3. Сейсморазведка при изучении никеленосных ультраосновных массивов Печенгского района / Ю.Г. Шопин, Т.Б.Гавловская, Н.Н.Осокин, Е.Р.Литвиненко, В.А.Тарасов. – Разведка и охрана недр, 1974, № 9.

4. Шопин Ю.Г. Методика сейсмического картирования никеленосных массивов Печенги. – Зап. ЛГИ, 1981, т. 89.