Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1987, т. 113

УДК [550.834+550.832.42]:553.3/.4(470.21)

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН, ОТРАЖЕННЫХ ОТ ГРАНИЦ ПЕЧЕНГСКОГО ЭФФУЗИВНО-ОСАДОЧНОГО КОМПЛЕКСА

М.Д.ЛИЗИНСКИЙ, В.С.ЛАНЕВ,
Ю.П.СМИРНОВ, М.Ю.ПАНЕНКОВА

Природа волн, связанных с сейсмическими границами, исследуется как в нефтяной, так и в рудной сейсморазведке. Одним из основных средств изучения акустической структуры отражающих границ является сейсмическое моделирование разрезов на основе расчета теоретических сейсмограмм и сопоставления их с реальными волновыми полями. Для осадочных бассейнов, удовлетворительно описываемых горизонтально-слоистыми сейсмическими моделями, теоретическое поле отраженных волн рассчитывается обычно по вертикали по алгоритму Баранова - Кунетца [7]. Установлено, что регистрируемые волны являются результатом конструктивной интерференции элементарных отражений от контактов тонкослоистых пачек, в которых отдельные слои отличаются упругими параметрами.

Природа отражающих границ, прослеживаемых в рудных районах, исследована пока в меньшей степени. Отставание связано с объективными трудностями сейсмического моделирования разрезов кристаллических пород, по сложности обычно значительно превосходящих разрезы осадочных бассейнов [6]. Отличительной характеристикой разрезов рудных районов является сложная пликативная и дизъюнктивная тектоника, интенсивно проявленный магматизм, относительно слабая дифференциация пород по упругим свойствам. Все это определяет, как правило, высокую сложность волновых полей, слабую интенсивность отраженных волн, ограниченные области их прослеживания и ряд других особенностей. Для таких волновых полей пока трудно создавать адекватные сейсмические модели.

В связи с этим представляет интерес изучение физической и геологической природы отраженных волн в таких рудных районах, разрезы которых относительно менее сложны, а сейсмические модели могут быть построены доступными средствами. К числу этих районов относится Печенгский на северо-западе Кольского полуострова. Известные здесь месторождения медно-никелевых руд связаны с протерозойским (печенгским) эффузивно-осадочным комплексом, образующим одноименную грабен-синклиналь на архейском гнейсовом основании.

Для изучения тектонических структур печенгского комплекса выполнен большой объем сейсмических исследований [1], в результате которых выявлен и прослежен по площади ряд устойчивых отражающих границ, которые связаны, в основном, с маломощными (до 0,2 км) осадочными горизонтами, разде-

ляющими мощные (свыше I км) вулканогенные толщи. Маркирующий характер прослеженных отражающих границ обеспечил возможность построения по ним структурных карт, благодаря чему тектоника эффузивно-осадочного комплекса была изучена для всей площади Печенгской структуры. Позднее эти границы были пересечены стволом Кольской сверхглубокой скважины СГ-3, по которому также были проведены сейсмические наблюдения - методом вертикального профилирования (ВСП) [3].

Рассматриваемые отражающие границы характеризуются крутыми углами падения (до 40^0 и более) и прослеживаются практически до дневной поверхности (выходят под моренные отложения мощностью обычно до нескольких метров). Поэтому годографы отраженных волн от этих границ смыкаются с годографами первых волн в области пересечения границ сейсмическим профилем, наземным и вертикальным. На этой основе строится привязка отражающих границ к геологическому разрезу.

Для ВСП годографы вступлений или одноименных фаз прямой и отраженной волны смыкаются в точке пересечения профилем отражающей границы. Строго говоря, это утверждение справедливо для границы I рода, т.е. контактов таких тел, мощность которых превышает в несколько раз длину падающих волн.

В реальных волновых полях точность привязки волн по фазовым годографам ограничена, поскольку практически невозможно выявить вступления отраженных волн и соответственно идентифицировать номер последующих фаз колебаний. Это вызывает систематическую ошибку, которую можно оценить для пересечения годографов соседних фаз колебаний (экстремумов одного знака).

Годографы прямой и отраженной волны в области их пересечения вблизи границы можно считать прямолинейными. При равенстве видимых частот рассматриваемых волн погрешность привязки, вызванная неверной идентификацией фаз,

$$\Delta\ell/T = \sin(\operatorname{arctg} v_1)\sin(\operatorname{arctg} v_2)/\sin(\operatorname{arctg} v_2 - \operatorname{arctg} v_1),$$

где $\Delta\ell$ - расстояние по вертикальному профилю; T - видимый период колебаний; v_1 и v_2 - кажущаяся скорость прямой и отраженной волн.

Для практически важных частных случаев погрешность оценивается следующим образом (частота колебаний 60 Гц):

v_2, км/с	∞	$-v_1$
$\Delta\ell/T$, км/с	v_1	$0{,}5\,v_1$
$\Delta\ell$, км	~0,1	~0,05

При сопоставлении одноименных фаз прямых и отраженных волн одинаковой частоты погрешность отсутствует. В противном случае она растет пропорционально разности между номерами фаз. К увеличению ошибки может приводить также меньшая видимая частота отраженных волн, по сравнению с прямыми.

Как показывает изучение формы сейсмических волн, их первые фазы не являются самыми интенсивными, поэтому в сложных волновых полях в Печенг-

ском районе, представленных большим числом интерферирующих волн разных типов, малоинтенсивные фазы могут быть пропущены при корреляции. В результате этого погрешность геологической привязки отражений по пересечению их годографов с годографом первых волн обычно приводит к завышенной оценке глубины сейсмической границы.

Более точные результаты достигаются при обработке волнового поля на ЭВМ [4] в результате его деконволюции и разделения волн, что существенно сокращает длительность волновых пакетов и увеличивает разрешенность записи. Но даже в этом, идеальном случае (при пересечении годографов вступлений первой волны и отражения) может быть определено положение либо границы I рода, либо верхняя граница области разреза, которая формирует отраженную волну, если последняя имеет интерференционную природу.

Для части разреза эффузивно-осадочного комплекса - Печенгского рудного поля - установлено, что отражающие границы по своей акустической структуре представляют собой тонкослоистые пачки [5]. Можно ожидать, что и другие отражающие границы этого комплекса имеют столь же сложную физическую структуру, а не являются границами I рода.

В этих условиях привязка отраженных волн к геологическому разрезу по фазовым годографам была бы весьма приближенной, поэтому для привязки маркирующих отражений от печенгского комплекса использован хорошо известный метод синтетических сейсмограмм. Он разработан для горизонтально-слоистых сред, однако, как показали оценки и опыт применения в Печенгском районе [5], пригоден также для изучения моноклинальных структур из пунктов взрыва (ПВ), смещенных в направлении падения отражающих границ, когда разрезы слабо дифференцированы по скорости.

Метод состоит в построении синтетической сейсмограммы, сопоставлении ее с реальным волновым полем и в определении на этой основе акустической структуры[x] отражающих пачек и в геологической привязке волн. В обычной модификации синтетическая сейсмограмма отраженных волн сопоставляется с трассой реальной сейсмограммы МОВ, зарегистрированной в точке возбуждения. Для разреза печенгского комплекса этот путь нецелесообразен, потому что отраженные волны в точке возбуждения мало интенсивны: коэффициенты отражения обычно имеют порядок 10^{-2}. Но на сейсмограммах ВСП отражения хорошо коррелируются, особенно в области смыкания годографов отраженных и прямых волн. Поэтому для сравнения реального волнового поля и синтетической сейсмограммы принята форма, отличающаяся от традиционной: отраженные волны синтетической сейсмограммы сопоставляются с областью привязки реальных отражений ВСП по фазовым годографам. Для реализации такой формы сравнения синтетическая сейсмограмма вычисляется не в точке возбуждения, как обычно, а вдоль вертикального профиля, т.е. в точках образования отраженных волн [5]. Совпадение времени (или глубины) регистрации повышенных амплитуд синтетиче-

---

[x] Под акустической структурой подразумевается распределение по вертикали упругих свойств: скорости упругих волн, плотности, акустической жесткости.

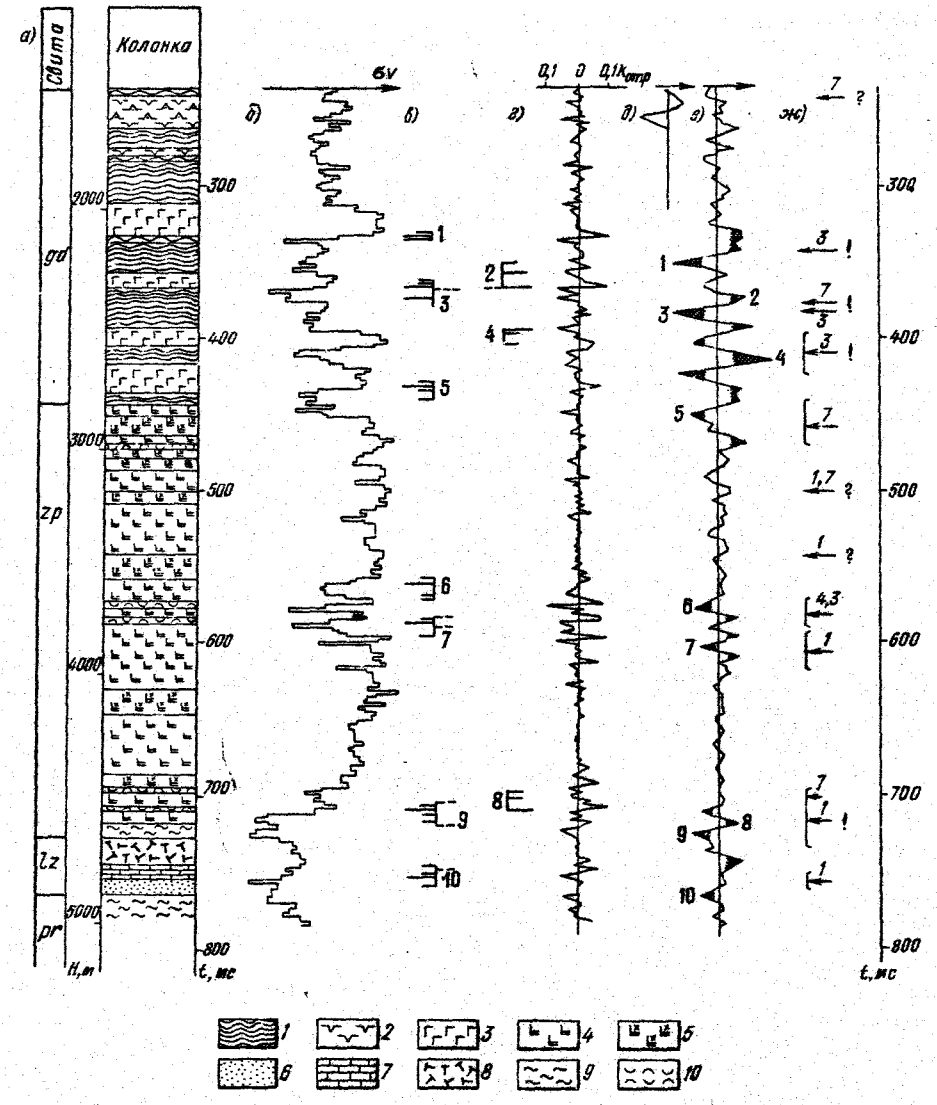


Рис.1. Выделение отражающих пачек в разрезе печенгского комплекса: а - геологическая колонка Кольской сверхглубокой скважины, схематизированная по [3]; б - график акустической жесткости; в - структура отражающих пачек 1-10 (горизонтальные штрихи означают относительные вклады контактов в амплитуду экстремума, соответственно длинные и короткие - выше и ниже фона, пунктирные штрихи - вклады гашения); г - график коэффициента отражения $K_{отр}$; д - исходный импульс; е - синтетическая сейсмограмма (заштрихованы амплитуды выше фоновых); ж - привязка отраженных волн, прослеженных на ВСП (1, 3, 7 и 4 - номера пунктов взрыва, со скобкой и без скобки - одно-двухфазные и многофазные отражения, вопросительный и восклицательный знаки - относительная интенсивность отражений соответственно слабая и сильная)

1 - осадочные породы ждановской свиты (филлиты, алевролиты и др.); 2 - ультрабазиты; 3 - габбро-диабазы; 4 - диабазы равномернозернистые; 5 - диабазы пятнистые, миндалекаменные, шаровые лавы; 6 - песчаники; 7 - карбонатные породы; 8 - порфириты; 9 - сланцы, милониты; 10 - туфо- и лавобрекчии

ской сейсмограммы с областью привязки реальных отражений рассматривается как свидетельство эффективности моделирования среды исходным сейсмоакустическим разрезом. В этом случае синтетическая сейсмограмма служит основным источником дальнейшего анализа - определения акустической структуры отражающих пачек и геологической их природы.

Анализ природы отражающих границ, связанных с печенгским комплексом, выполнен по данным наблюдений в Кольской скважине СГ-3 [3]. Это единственная скважина, которая пересекла все толщи эффузивно-осадочного комплекса и связанные с ним отражающие границы. Синтетическая сейсмограмма рассчитана для части ствола на глубине I,8-5 км (рис.I), содержащей основные маркирующие отражающие границы. Сейсмограмма построена с помощью программы Н.Е.Гриня [2], приспособленной для анализа структуры отражающих границ. В качестве исходного импульса использована запись первой волны на ВСП в СГ-3. Синтетическая сейсмограмма сопоставлена с данными привязки отражений, которые зарегистрированы при ВСП из ПВ, смещенных от СГ-3 по падению печенгского комплекса. Результаты сопоставления (рис.I,е,ж) благоприятны: повышенные амплитуды синтетической сейсмограммы в целом соответствуют интервалам привязки к стволу СГ-3 реальных отражений.

На синтетической сейсмограмме прослеживается до 20 фаз, по интенсивности в 2-3 раза превышающих фоновые значения. Анализ проведен для части этих фаз, равномерно распределенных по разрезу. При этом использована специализированная печать результатов вычисления синтетической сейсмограммы, облегчающая определение вкладов отдельных контактов в общую сумму - амплитуду отраженного сигнала [5]. Рассматривались эффекты, касающиеся экстремальных значений интенсивности выбранных для анализа фаз колебаний.

Относительные вклады отдельных контактов рисуют схему акустических структур отражающих границ (рис.I,в), в которой показано как положительное, так и в ряде случаев отрицательное (гасящее) воздействие контактов на суммарную амплитуду. В этих схематических изображениях структур не показаны второстепенные вклады, составляющие менее I0 % от общей амплитуды экстремума.

Все без исключения интенсивные фазы синтетической сейсмограммы имеют интерференционную природу, т.е. обязаны пачкам, составленным как минимум из двух-трех, а многие - из шести-семи маломощных слоев. Роль отдельных контактов неравноценна, но очевидно, что относительно слабые акустические границы в конечном счете вносят существенный суммарный вклад, обычно превышающий 50 % от амплитуды экстремума (рис.2).

Определяющую роль в структуре пачек, формирующих интенсивные отражения, играет частотный состав исходного импульса. Использованный для построения сейсмограммы импульс имеет полупериод I2 мс, которому соответствует полуволна длиной 60-70 м. Необходимым условием образования интенсивных фаз является согласование периодичности коэффициента отражения с исходным импульсом. Именно такое согласование наблюдается для выделенных отражающих пачек, в пределах которых обращение знака относительно высоких

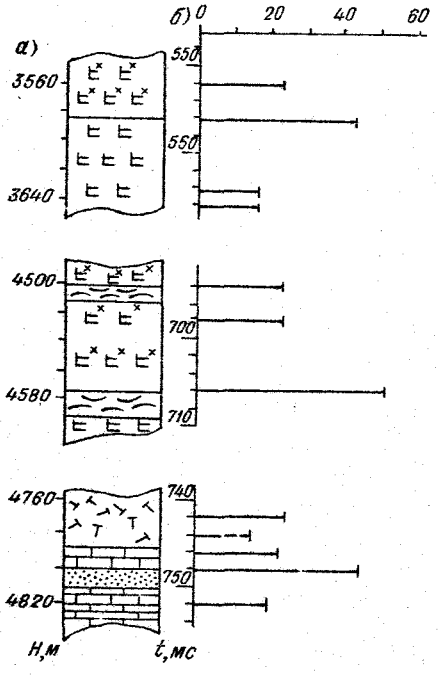


Рис.2. Примеры отражающих пачек 6, 8 и 10 соответственно в разрезе Кольской скважины: а - схематизированная геологическая колонка (условные обозначения см. на рис.1); б - относительные вклады акустических контактов в амплитуду экстремума синтетической сейсмограммы в процентах (пунктирные штрихи - вклады гашения)

коэффициентов отражения наблюдается через 10-12 мс или 60-70 м. Тот же эффект на графике акустической жесткости проявляется в чередовании акустически жестких и мягких слоев указанной мощности как условия интенсивных отражений.

Таким образом, акустическая структура изученных отражающих границ печенгского комплекса определяется, как и в осадочных бассейнах, тонкослоистыми пачками, а интенсивные отраженные волны являются результатом конструктивной интерференции элементарных отражений от контактов отдельных тонких слоев в составе пачки.

От определения акустической структуры отражающих пачек можно перейти к их геологической природе, если сопоставить контакты, вносящие весомый вклад в амплитуду отражений, с геологической колонкой. На синтетической сейсмограмме выделяются три интервала интенсивных фаз. Первый из них на глубине 2,0-2,9 км, в основном соответствует нижней части разреза ждановской свиты gd [3], представленной метаморфизованными осадками флишевого типа и вмещающей интрузивы основных и ультраосновных пород, в том числе рудоносные. Второй интервал (3,7-3,8 км) приурочен к туфогенному горизонту, разделяющему вулканогенную толщу заполярнинской свиты $\varkappa p$, третий (4,5-5,0 км) представлен, главным образом, осадочными породами, порфиритами и кристаллическими сланцами лучломпольской свиты $l\varkappa$, а также верхней частью разреза пирттиярвинской свиты pr в области действия разрывного нарушения, так называемого Лучломпольского.

В пределах именно этих трех интервалов отмечаются повышенные (до 0,1 и более) коэффициенты отражения, а реальные отражения ВСП наиболее интенсивны.

Среди рассматриваемых десяти отражающих пачек пять расположены в пределах ждановской свиты. Доминантами ее акустического разреза являются четыре интрузии габбро-диабазов, три из которых имеют акустическую жесткость, близкую к максимальной для всего рассматриваемого разреза. Все пять пачек формируются с участием контактов габбро-диабазов. Это касает-

ся и других интенсивных фаз отражений, для которых структура отражающих пачек здесь не приводится.

Жесткие контакты интрузивов с вмещающими осадками вносят основной вклад в амплитуду отражений. Однако и другие контакты в структуре пачек, второстепенные по индивидуальному вкладу, имеют, как указывалось выше, в сумме не меньшее значение, чем жесткие контакты. Нежесткие акустические контакты связаны в основном с внутренними границами между различными осадочными породами.

Отражающие пачки 6 и 7 (см. рис.I) приурочены к центральной части разреза заполярнинской свиты, первая из них (см. рис.2) имеет волноводную структуру, формируемую на контактах равномерно-зернистых диабазов с породами того же состава, но обладающими выраженными текстурными особенностями. Последние, по-видимому, являются причиной снижения акустической жесткости породы.

Геологическая природа пачки 7 определяется туфогенным горизонтом в разрезе вулканогенной толщи (заполярнинской свиты). Основной вклад здесь вносится жестким контактом туфов и диабазов, важную роль играет также соответствие мощности связанного с туфами волновода длине полуволны импульса.

Отражающие пачки 9 и I0 связаны со сланцами и милонитами нижней части разреза заполярнинской свиты и с породами лучломпольской свиты. Контакт диабазов со сланцами вносит основной вклад в интенсивность отражения пачки 9. В пачке I0 таким контактом является граница относительно жестких андезитовых порфиритов с подстилающими осадками. Пачка содержит также три других контакта, вносящих положительный вклад в амплитуду отражения, и один контакт гасящего действия.

В волновом поле ВСП отражения от нижней части разреза ждановской свиты представлены непротяженными интенсивными осями синфазности. Их ограниченное прослеживание, по-видимому, связано с линзовидным залеганием интрузивов, а жесткие их акустические контакты с вмещающими осадками являются одной из основных причин высокой интенсивности отражений. Вместе с тем волны от туфогенного горизонта заполярнинской свиты и от зоны Лучломпольского разрывного нарушения, которым соответствуют интенсивные фазы синтетической сейсмограммы (пачки 6-I0), прослеживаются значительно лучше. Это обстоятельство указывает на бо́льшую, чем для упомянутых границ ждановской свиты, протяженность горизонтов. О такой значительной протяженности свидетельствует весь опыт сейсмических исследований Печенгской структуры: указанные отражающие границы являются маркирующими. Рассматриваемые волны образуют группы со сложной корреляцией, которая не является непрерывной. Такой "штриховой" характер прослеживания указывает на изменение внутренней структуры отражающих пачек при сохранении в целом их структурно-геологического положения. Действительно, временна́я "мощность" каждой из этих пачек не превосходит I4 мс, т.е. около 80 м, и трудно представить, что такие объекты сохранят неизменными свои акустические свойства на всей площади Печенгской структуры. Тем не менее рассмотренные геологические

причины высокой интенсивности связанных с ними волн - контакты туфов с диабазами, порфиритов с милонитизированными породами в пределах разрывного нарушения, а также благоприятное соотношение структур отражающих пачек с длиной волны взрывного импульса - эти факторы могут оставаться стабильными на всей площади структуры.

Таким образом, как показал анализ механизма образования интенсивных отражений в пределах печенгского комплекса, они находят вполне удовлетворительное геологическое объяснение.

Выводы

1. Акустическая структура отражающих границ, связанных с печенгским эффузивно-осадочным комплексом, представляет собой, как и в осадочных бассейнах, тонкослоистые пачки, в которых отдельные слои отличаются по упругим параметрам. Эти пачки многослойны (до 6-7 слоев). Амплитуда интерференционной отраженной волны от пачки определяется вкладом не только акустически жестких, но и мягких (до 50 % и более) контактов.

2. Интенсивность отраженных волн зависит от соотношения параметров импульса прямой волны и акустической структуры отражающей границы. Чем ближе мощность слоев отражающей пачки к полудлине прямой волны, тем выше интенсивность отражения.

3. Геологическая привязка двух маркирующих отражающих границ к разрезу Кольской скважины показала, что в акустической структуре обеих пачек имеются жесткие контакты, определяющие основной вклад в интенсивность соответствующих волн. Качество прослеживания этих границ по площади Печенгской структуры связано скорее всего с устойчивостью указанных жестких контактов в разрезе эффузивно-осадочного комплекса.

4. Непротяженные отражающие границы в нижней части разреза ждановской свиты связаны в основном с жесткими контактами габбро-диабазовых тел и вмещающих осадочных пород, играющими роль доминант в акустической структуре отражающих пачек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глубинное строение Печенгско-Аллареченского никеленосного района по геофизическим данным / Верба В.В., Завинская Г.А., Кокорина Л.К. и др. - В кн.: Восточная часть Балтийского щита. Геология и глубинное строение. Л., Наука, 1975, с. 110-117.

2. Гринь Н.Е. Исследование структуры и свойств среды по динамике сейсмических волн. Киев, Наукова думка, 1979. 214 с.

3. Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины / Под ред. Е.А.Козловского. М., Недра, 1984. 490 с.

4. Методическое руководство по вертикальному сейсмическому профилированию скважин / Сивков Н.Р., Сырцов А.В., Антипин Ю.Г. и др. М., Недра, 1978. 62 с.

5. Опыт применения комплексных сейсмоакустических исследований на Печенгском рудном поле / Лизинский М.Д., Поспелов С.Г., Терентьев В.Г. и др. - Зап. ЛГИ, 1984, т. 101, с.15-23.

6. Сейсмический метод отраженных волн в рудных районах. Методическое руководство / Караев Н.А., Лукашин Ю.П., Рабинович Г.Я. и др. Л., Недра, 1982. 308 с.

7. B a r a n o v V., K u n e t z G. - Geophys. Prosp., 1960, N 8, p.315-325.