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

УДК 550.834.32.05.001.57

О ВОЗМОЖНОЙ ПРИРОДЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ОТ ПОВЕРХНОСТИ МОХОРОВИЧИЧА НА БАЛТИЙСКОМ ЩИТЕ

А.Г.ГОНЧАРОВ

К настоящему времени во многих регионах накоплены обширные данные о сейсмических свойствах границы между земной корой и верхней мантией, свидетельствующие, что представления о поверхности Мохоровичича (M) со времен ее первооткрывателя существенно изменились. Первоначально, в 1910 г., по излому годографа сейсмических волн от близкого землетрясения А.Мохоровичич выделил границу на глубине 50 км со скоростью 7,7 км/с, перекрытую слоем со средней скоростью 5,7 км/с. В 1916 г. также по записям близких землетрясений была выделена граница со скоростью около 8,0 км/с на глубине 60 км. Впоследствии она была названа поверхностью Мохоровичича, а покрывающий ее слой со скоростью 6,0-6,5 км/с был идентифицирован в качестве земной коры [6]. Позже Б.Гутенберг поверхностью M назовет границу между верхними слоями со скоростью продольных волн, равной или меньшей 7,0 км/с, и материалами, залегающими ниже, со скоростью продольных волн около 8,0-8,25 км/с [9]. До середины 50-х гг. граница M представлялась в виде резкого барьера между мощными однородными слоями.

Как видим, уже в первый период изучения данной проблемы (1910-1955) существовала определенная неоднозначность в оценке скорости сейсмических волн над границей M и под ней, но в период господства простейших (однослойной и двухслойной) моделей земной коры эта неоднозначность не казалась большим препятствием для изучения самой границы M, так как перепад скорости на ней все равно оставался достаточно большим. Сегодня стало очевидно, что переход кора - мантия во многих районах является сложной зоной, существенно изменяющейся от региона к региону.

Судя по результатам интерпретации данных глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) последних лет методом математического моделирования, необходимость пересмотра представлений о коромантийном переходе назрела и на Балтийском щите [1, 3, 4].

Для построения современной сейсмической модели коромантийного перехода необходимо определить скоростную характеристику нижней части коры непосредственно над поверхностью M. При этом возникает вопрос о выделении здесь слоя со скоростью сейсмических волн 7,0-7,5 км/с или более. Существование такого слоя в коре Балтийского щита до недавнего времени подвергалось сомнению [2].

Нижняя часть коры, глубже 30 км, обычно является «выпадающим" слоем, ибо формирующиеся здесь сейсмические волны не прослеживаются в первых вступлениях. О максимальной пластовой скорости в этой части разреза можно судить по кажущейся скорости закритического отражения от поверхности M в его дальней, асимптотической части, если такое отражение в волновом поле удается выделить. Асимптотическое значение кажущейся скорости на разных профилях в восточной части щита меняется в интервале большем чем от 6,7 до 7,5 км/с, что принципиально важно. Это означает, что слой с такими значениями скорости присутствует в разрезе.

Значения пластовой скорости, большие 7,0 км/с, обычно не могут быть распространены на всю мощность рассматриваемого слоя, так как рефрагирующая в таком мощном слое волна (или волна, преломленная на его верхней границе) должна была бы прослеживаться в первых вступлениях в значительном интервале расстояний от пункта взрыва до прибора x, подобно волне $P^{\lambda B}_{реф}$ (рис.I,а). Выделение волн с кажущейся скоростью 7,0-7,5 км/с в экспериментальных первых вступлениях весьма спорно даже для небольших интервалов. Кроме того, при большой мощности слоя с пластовой скоростью более 7,0 км/с (рис.I,в, модель I) ощутимое расхождение отраженной от поверхности M и рефрагирующей в верхней мантии волн будет иметь место лишь при $x > 220$ км (рис.I,а, волны $P^{B}_{отр}$ и $P^{Bc}_{реф}$). Экспериментальные данные показывают, что если отражение от поверхности M существует, его кинематика близка к кинематике волн $P^{F}_{отр}$ и $P^{K}_{отр}$ (рис.I,а), полученных от моделей с тонким слоем с пластовой скоростью более 7,0 км/с (рис.I,в, модели 2 и 3).

Таким образом, кинематические особенности волн группы M и первых вступлений коровых волн свидетельствуют о небольшой (2-3 км) мощности слоя со скоростью продольных волн более 7,0 км/с.

Нужно признать, что положение маломощного слоя со скоростью 7,0-7,5 км/с в нижней части коры остается неопределенным. Его можно помещать на глубине около 30 км и отделять волноводом от области кормантийного перехода (рис.I,в, модель 3, слой HJ) в том случае, когда связанные с ним преломленные волны ($P^{HJ}_{реф}$) удается выделить в первых или хотя бы последующих вступлениях (рис.I,а). Этот слой может находиться и непосредственно в переходной зоне кора - мантия (рис.I,в, модель 2, слой EF). Кинематика отражения от поверхности M в этом случае тождественна предыдущему (волны $P^{F}_{отр}$ и $P^{K}_{отр}$), а рефрагирующая в слое EF волна $P^{EF}_{реф}$ имеет годограф, практически совпадающий с годографом закритического отражения от поверхности M (рис.I,а, волны $P^{F}_{отр}$ или $P^{K}_{отр}$).

Таким образом, мощность и положение в разрезе слоя с промежуточной между корой и мантией скоростной характеристикой определяются конкретными особенностями волнового поля в том или ином районе и в принципе могут быть установлены. Более серьезная проблема, связанная с кормантийным переходом, заключается в другом.

При подборе теоретических годографов к экспериментальным вступлениям волн группы M, зарегистрированным на различных профилях ПСЗ в восточной

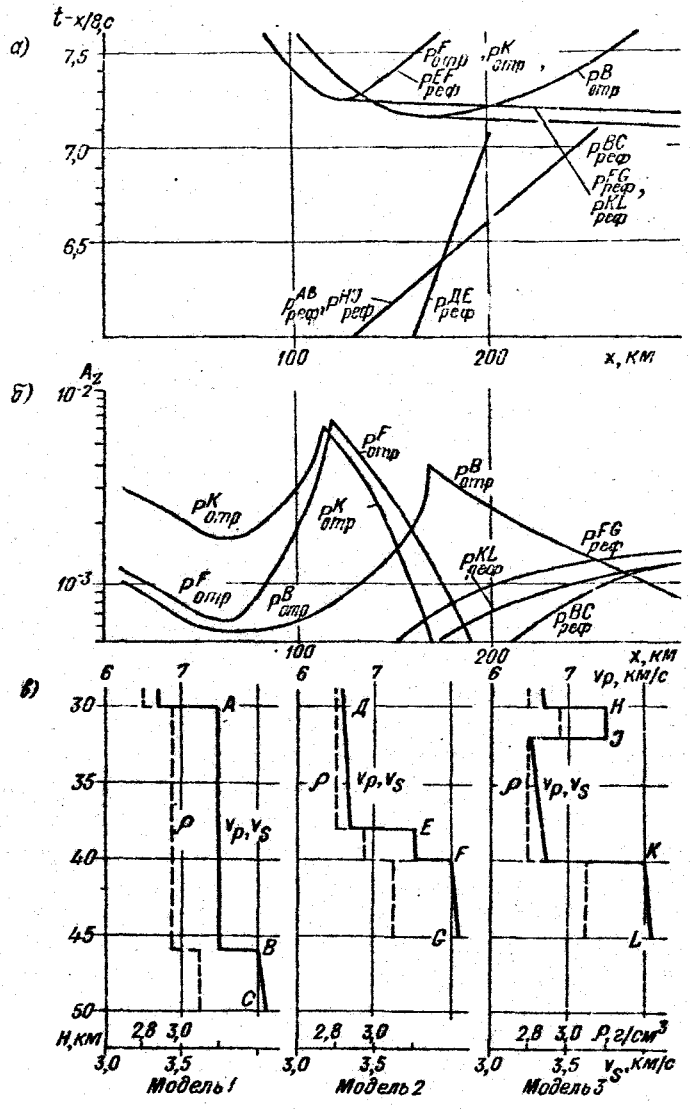


Рис.1. Теоретические годографы (а) и амплитудные графики (б) для сейсмических моделей зоны перехода кора - мантия (в), содержащих границы 1 рода

$P_{реф}$ и $P_{отр}$ - продольные рефрагированные и отраженные волны; обозначения слоев и границ моделей соответствуют верхним индексам волн на годографах и амплитудных графиках; A_z - вертикальная составляющая амплитуды

части щита, и при сопоставлении теоретических амплитудных графиков этих волн с качественными экспериментальными динамическими характеристиками установлено, что традиционная модель, где переход от коры к мантии представлен одной резкой сейсмической границей I рода с перепадом скорости от

6,7-7,5 км/с в коре до 8,0-8,2 км/с в мантии, во многих случаях плохо соответствует экспериментальным данным. Независимо от мощности и положения в разрезе слоя со скоростью 7,0-7,5 км/с (рис.I,в) для волн, отраженных от поверхности M, моделируемой простой границей I рода, характерно довольно резкое уменьшение амплитуд в закритической области (рис.I,б), волны $P^{B}_{отр}$, $P^{F}_{отр}$, $P^{K}_{отр}$). Теоретически эти волны должны иметь меньшие амплитуды, чем волны, рефрагирующие в верхней мантии (рис.I,б, волны $P^{BC}_{реф}$, $P^{FG}_{реф}$, $P^{KL}_{реф}$) при некотором удалении от источника (x = = 180-250 км в зависимости от мощности и положения в разрезе слоя со скоростью 7,0-7,5 км/с). Это во многих случаях прямо противоречит экспериментальным результатам: волны $P^{M}_{реф}$ или $P^{M}_{прел}$ очень слабы, а закритические отражения от поверхности M доминируют по амплитуде в некоторых случаях вплоть до x = 300 км.

Стремясь преодолеть это противоречие, мы предприняли расчеты теоретических годографов и амплитудных графиков для сейсмических моделей зоны перехода кора - мантия, содержащих границы II рода (рис.2, модели 2 и 3) [5].

Принципиальной особенностью таких моделей является то, что отраженная от поверхности M волна в них просто не формируется, поскольку никакого перепада акустической жесткости на границе M нет.

Теоретический годограф рефракции в градиентном переходном от коры к мантии слое (рис.2,б, волны $P^{EF}_{реф}$ или $P^{KL}_{реф}$) по форме не отличим от годографа отражения от границы I рода (рис.2,б, волна $P^{B}_{отр}$). Это обусловлено специфической формой лучей и существованием каустики волновых фронтов в пределах слоя с повышенным градиентом скорости [I]. Начальная точка такого годографа находится тем дальше от источника, чем мощнее градиентный переходный слой (рис.2,а и б), и является общей с годографом волны, рефрагирующей в верхней мантии ($P^{FH}_{реф}$ или $P^{LM}_{реф}$). Важно, что до начальной точки никаких волн от зоны перехода кора - мантия существовать не должно. Волны $P^{EF}_{реф}$ и $P^{KL}_{реф}$ имеют более высокий уровень амплитуд, чем отражение от границы I рода ($P^{B}_{отр}$) во всей области их прослеживания и доминируют над волнами, рефрагирующими в верхней мантии (рис.2,в, волна $P^{FH}_{реф}$ или $P^{LM}_{реф}$). Следовательно, "динамическое противоречие", отмеченное выше, в моделях данного класса устраняется. Вместе с тем возникает другая сложность. На экспериментальных сейсмограммах, как правило, регистрируются какие-то волны от зоны перехода кора - мантия в докритической области. Точка начала регистрации этих волн колеблется в пределах x = 70÷100 км на разных профилях и для разных источников. Характерная особенность этих волн - кажущаяся скорость, существенно большая чем 8,0 км/с. Соответствующие оси синфазности составляют начало волнового пакета группы M вплоть до начальной точки рефрагирующей в верхней мантии волны. Кинематика этих волн часто плохо соответствует отражению от поверхности M, если ее рассматривать как простую границу I рода. Иначе говоря, экспериментальный годограф отражения от поверхности M во многих случаях не является правильной гиперболой.

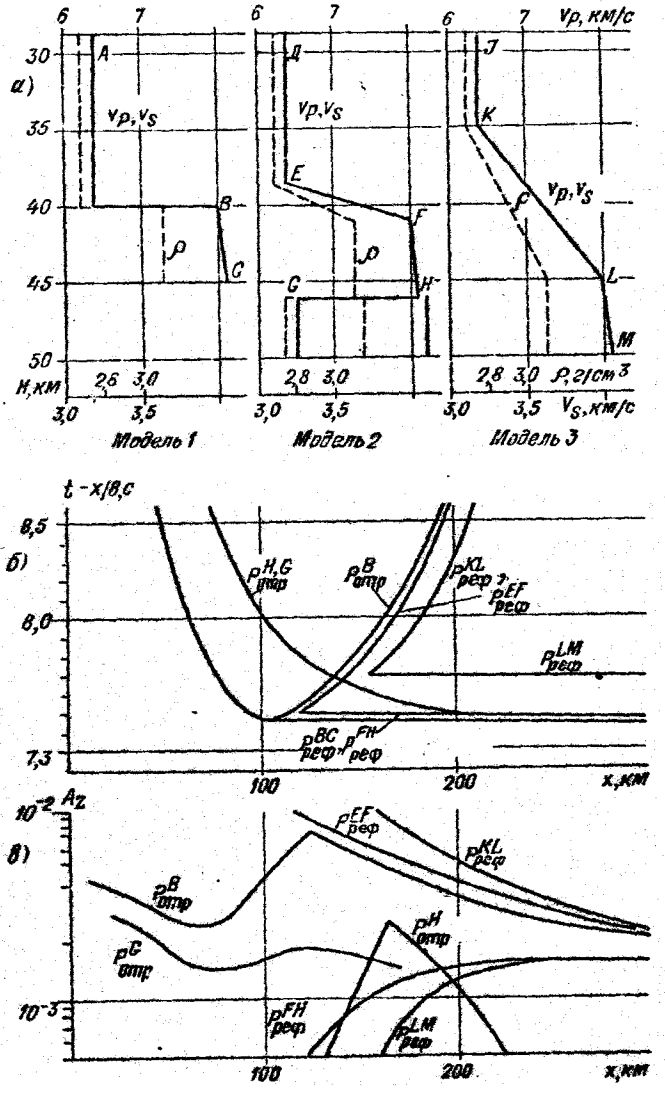


Рис.2. Сейсмические модели зоны перехода кора – мантия (а), содержащих границы II рода, теоретические годографы (б) и амплитудные графики (в). Условные обозначения см. на рис.1

На это обстоятельство обратили внимание И.И.Павленкова и Т.В.Смелянская [7], заметив, что обычно волны группы M начинают регистрироваться на расстоянии от источника, большем 60–80 км, при этом кажущиеся скорости в этом интервале должны быть около 9–10 км/с, на самом деле они достигают 15–20 км/с. Они предлагают объяснять этот факт существованием отдельных, очень крутых отражающих площадок в зоне перехода кора – мантия. Однако, завышение кажущейся скорости отражений от поверхности M в докритической области по сравнению с правильной гиперболой зачастую отмечается

и на встречных, и на нагоняющих годографах. Трудно представить существование крутых отражающих элементов, расположенных закономерно по всей длине того или иного профиля ГСЗ.

В некоторых работах сложный годограф рассматриваемой волны пытаются согласовать с теоретическим, разделив его на отдельные части. Так поступает П.Гизе при построении модели земной коры вдоль профиля Эленлое – Даго – Лагораи [8]. Он выделяет четыре отдельных ветви на годографе отражения от поверхности M и получает сложную четырехслойную модель зоны перехода кора – мантия с переменным вертикальным градиентом скорости и волноводами.

С нашей точки зрения, объяснение неправильной формы годографа отраженной от поверхности M волны в докритической области может быть довольно простым: здесь фиксируются отражения от подошвы слоя M или, иначе говоря, подэкранные отражения от внутримантийной границы, над которой расположен слой мощностью в несколько километров с пластовой скоростью около 8,0 км/с. Вопрос об отражении от кровли этого слоя в докритической области остается открытым, если поверхность M – граница I рода: теоретически обязанное существовать, это отражение не имеет аналога в экспериментальном волновом поле. Если поверхность M трактовать как сейсмическую границу II рода и подошву высокоградиентного переходного кормантийного слоя, этот вопрос решается. Никакого докритического отражения и не должно быть, а так называемая закритическая отраженная волна является не отраженной, а рефрагированной в переходном слое. Оси синфазности с высокой кажущейся скоростью в докритической области объясняются подэкранным отражением. Это волны типа $P^{\acute{e}}_{\text{отр}}$, $P^{H}_{\text{отр}}$ (рис.2,б), рассчитанные для модели 2 (рис.2,а). Волна $P^{\acute{e}}_{\text{отр}}$ является отражением от границы с резким уменьшением скорости, а $P^{H}_{\text{отр}}$ – от границы с небольшим ее увеличением. Кинематика этих волн абсолютно идентична. Амплитуды подэкранных отраженных волн определяются перепадом скорости на отражающей границе (рис.2,в). Значительное увеличение скорости под границей приведет к увеличению кажущейся скорости регистрируемых в первых вступлениях мантийных волн. Если такого увеличения в экспериментальном волновом поле нет, то есть все основания связывать формирование этих волн со слоем пониженной скорости в верхней мантии. Изменяя перепад скорости на подэкранной отражающей границе и градиент скорости в покрывающем ее слое, можно добиться близкого к экспериментальному соотношения амплитуд волн $P^{\acute{e}}_{\text{отр}}$ (или $P^{H}_{\text{отр}}$) и $P^{\acute{e}H}_{\text{реф}}$ (или $P^{LM}_{\text{реф}}$).

При анализе экспериментальных волновых полей группы M выяснилось, что для некоторых участков профилей ГСЗ в восточной части Балтийского щита характерно отсутствие закритического отражения от поверхности M или эквивалентной рефрагированной в переходном слое волны. Запись волн группы M на сейсмограммах в таком случае представлена серией колебаний с кажущейся скоростью около 8,0 км/с. При удалении от источника не происходит характерного для закритических отражений или эквивалентных рефрагированных волн убывания кажущейся скорости. Такие признаки свидетельствуют

о значительной мощности переходного коромантийного слоя, так как начальная точка рефрагирующей в нем волны находится тем дальше от источника, чем мощнее переходный слой (рис.2,б).

Выводы

Многие особенности кинематики и динамики сейсмических волн, связанных с зоной перехода кора – мантия в восточной части Балтийского щита, могут быть объяснены существованием не резкой границы I рода, а мощного до 10 км – градиентного слоя, в пределах которого скорость сейсмических волн нарастает от коровых до мантийных значений. В этом случае отраженной волны от поверхности Мохоровичича не существует. Ее место в волновом поле занимает рефрагированная в градиентном слое волна. Отражения, формирующиеся в зоне перехода кора – мантия и прослеживаемые в докритической области могут быть подэкранными отражениями от внутримантийной границы, а не от собственно поверхности Мохоровичича.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гончаров А.Г. К расчету сейсмической модели нижней части земной коры и переходной зоны кора – мантия по данным ГСЗ на Приладожском профиле. – В кн.: Зап. ЛГИ, 1982 т. 92, с. 10–15.

2. Земная кора восточной части Балтийского щита / Отв. ред. К.О. Кратц. Л., Наука, 1978. 228 с.

3. Кальнин К.А., Гончаров А.Г., Матвеева Н.Н. Сейсмические модели земной коры Балтийского щита. – В кн.: Глубинные сейсмические исследования в восточной части Балтийского щита и на прилегающих акваториях. Апатиты, изд. КФ АН СССР, 1985, с. 90–97.

4. Литвиненко И.В. Сейсмические исследования земной коры Балтийского щита. – В кн.: 27-й Междунар. геол. конгресс. Доклады. М., Наука, 1984. Т. 8. С. 08. Геофизика, с. 9–20.

5. Матвеева Н.Н., Антонова Л.Н. Метод и программа расчета кинематики и динамики объемных волн в трехмерных неоднородно-блоковых средах. – В кн.: Программы для интерпретации сейсмических наблюдений. Л., Наука, 1977, с. 173–242.

6. Павленкова Н.И. Волновые поля и модель земной коры. Киев, Наукова думка, 1973. 219 с.

7. Павленкова Н.И., Смелянская Т.В. Природа группы отраженных сейсмических волн от подошвы земной коры. – Изв. АН СССР, Физика Земли, 1970, № 1, с. 17–27.

8. Giese P. – Z.Geophys., 1972, v.38, N 3, p.395–405.

9. Gutenberg B. – Geol.Soc. Am., Spec.Paper, 1955, v.62, p.19–34.