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

УДК 550.834

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ГРАНИЦЫ КОНСОЛИДИРОВАННОЙ КОРЫ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА

И.В.ЛИТВИНЕНКО

Как известно, основные сведения о строении консолидированной материковой коры в настоящее время получены с помощью глубинных сейсмозондирований (ГСЗ). По данным ГСЗ, повсеместно в земной коре прослеживаются пологие сейсмические границы. Геологическая интерпретация этих границ до сих пор остается предметом дискуссии, хотя результаты ГСЗ широко используются для фундаментальных геологических выводов о современных структурах коры и ее развитии.

В процессе сейсмических исследований земной коры различной детальности представления о физических и геологических характеристиках сейсмических границ существенно уточнялись, что можно проследить на примере работ в восточной части Балтийского щита, выполненных ПО „Севзапгеология" и Ленинградским горным институтом.

В геологической интерпретации ГСЗ на Балтийском щите в 60-х гг. нашли отражение широко распространенные представления о „гранитном" и „базальтовом" составе коры материков. Первые исследования древних щитов в СССР методом ГСЗ проведены в Центральной Карелии (профиль Кемь - Ухта, 1958, [3]) и на северо-западе Кольского полуострова (профиль Баренцево море - Печенга - Ловно, 1960-1963, [2]), которые пересекают геологически хорошо изученные структуры Карело-Кольского геоблока [4], сложенные комплексами гнейсов, осадочно-вулканогенных образований, гранулитов и другими метаморфическими породами. С этого времени восточная часть Балтийского щита и особенно Печенгский район систематически изучаются сейсмическими методами различной детальности.

При первых работах ГСЗ на щите было выделено несколько сложных глубинных волн, которые переведены в разрез в соответствии с общепринятым представлением о том, что земную кору можно представить моделью, состоящей из нескольких мощных слоев, на границах которых скорость меняется скачкообразно и растет с глубиной, в результате чего существенная роль принадлежит преломленным волнам. При этих исследованиях выявлены следующие особенности сейсмических границ и разрезов коры Балтийского щита [2, 3, 4, 6].

Установлена типичная для материков глубина до границы Мохоровичича - мощность коры около 40 км - и расслоение ее по упругим свойствам. Однако первые пологие сейсмические границы выделены здесь на меньших глубинах, по сравнению с платформенными регионами, и характеризуются переменными значениями граничной скорости в пределах от 6,3 до 6,7 км/с. Эти границы

были отнесены к поверхности верхней неоднородной части „базальтового слоя"[2, 8].

В современном эрозионном срезе «гранитный слой" характеризуется значительным диапазоном скоростей. Чаще встречается скорость 5,5-6,0 км/с, соответствующая гранитам и гнейсам; имеются крупные неоднородности, где она растет до 6,5 км/с и более (вулканогенные толщи, гранулиты и др.).

Известные структуры верхней части коры щита с крутым падением различных комплексов пород и многочисленными разрывными нарушениями не находят прямого отражения на разрезах ГСЗ, имеющих только пологие границы. При интерпретации ГСЗ неизбежны осреднения неоднородностей, поскольку базы наблюдений превышают размеры структур. Однако наметились возможности изучать крутопадающие контакты и разрывные нарушения с помощью метода отраженных волн (МОВ) при меньших базах наблюдений.

Сложные структуры верхней части коры щита чаще «подсекаются" снизу пологими сейсмическими границами. Можно было полагать, что такие границы являются вторичными и связаны с расслоением земной коры под длительным действием термодинамических факторов – регионального метаморфизма.

Для верхних границ установлены изменения по латерали граничной скорости, связанные с упругими характеристиками перекрывающих их толщ. Увеличение граничной скорости отмечено под высокоскоростными вулканитами и гранулитами. Эти данные, подтверждая вторичный характер сейсмических границ, указали на значительное распространение на глубину неоднородностей. Блоковое строение коры также отмечается прерывистым характером сейсмических границ, хорошо согласуется с зонами глубинных разломов, данными гравиметрии и магнитометрии.

Неглубокое залегание высокоскоростных пологих сейсмических границ и хорошая геолого-геофизическая изученность наложенной на архейский фундамент Печенгской никеленосной вулканогенной структуры определили выбор ее для более детального изучения МОВ. Для решения подобных задач ни в условиях древних щитов, ни в других рудных районах ранее сейсморазведка не применялась. Считалось, что с помощью этого метода невозможно изучать сложные структуры, слагаемые метаморфизованными комплексами пород. Печенгский район стал первым рудным районом, где были определены разведочные возможности МОВ для подобных условий и выработана соответствующая методика, которая продолжает непрерывно совершенствоваться. Накопленный здесь опыт сыграл определенную роль в развитии этого метода в других рудных районах [1, 4, 8].

Рекогносцировочно-площадные сейсморазведочные работы развернулись в Печенгском районе в 1963 г. и успешно продолжались в течение 10 лет главным образом с целью изучения глубинного строения печенгского комплекса и тектонических факторов, контролирующих медно-никелевое оруденение. Наблюдения по площади дали возможность построить ряд опорных разрезов и структурные схемы по нескольким опорным отражающим границам: подошве печенгского комплекса и по осадочным и туфогенным горизонтам внутри него. Связь крутопадающих границ с теми или иными геологическими контактами и разрыв-

ными нарушениями устанавливалась по геологическим данным в местах, где эти границы приближаются к дневной поверхности.

Подводя итоги сейсмических исследований Балтийского щита различной детальности, проведенных в 70-х гг. [1, 4, 8], с учетом общего прогресса ГСЗ и других сейсмических методов [5, 9], необходимо отметить следующие основные результаты, существенно изменившие и углубившие представления о сейсмических границах и разрезах коры.

Расширились данные о сложном слоисто-блоковом строении коры древнего щита. Различные его блоки характеризуются не только неодинаковой общей мощностью коры, но и различаются по ее внутреннему строению – характеру сейсмических границ. Резко аномальными представляются разрезы коры в зонах сочленения Беломорского мегаблока с Карельским и последнего – с Русской плитой в Приладожье. Опорная граница, связанная с поверхностью Мохоровичича, существенно изменяет свои характеристики, отмечая различное строение переходной зоны от коры к верхней мантии. В переходной зоне нередко отмечается граница со скоростью около 7,2–7,3 км/с.

В земной коре установлены сейсмические границы трех типов. К первому из них отнесены отражающие границы различной ориентировки, часто крутопадающие, которые связаны с контактами пород различного состава и могут быть условно названы «первичными», поскольку они отражают сложные геологические структуры консолидированной коры. Второй тип границ объединяет крутопадающие отражающие «тектонические» границы, приуроченные к разрывным нарушениям различного возраста. Оба типа границ дают возможность изучать на глубине сложные складчатые первичные структуры консолидированной коры, включая и гнейсовые комплексы [4]. Третий тип границ – повсеместно наблюдаемые в различных регионах пологие внутрикоровые сейсмические разделы – представляются наложенными (вторичными), однако их природа требует дальнейшего изучения.

В одних случаях, благодаря выполаживанию на глубине «первичных» границ, наблюдается согласование их с пологими границами. Такие примеры, отмеченные для структур, сложенных эффузивно-осадочными комплексами, указывают на их наложенный характер. В других случаях намечается пересечение «первичных» и «тектонических» отражающих границ с пологими региональными горизонтами. Поэтому некоторые структурно-фациальные зоны могут распространяться на большие глубины, захватывая верхнюю треть всей мощности коры.

Опорные волны ГСЗ, переведенные в сейсмические границы, имеют сложный характер, допускающий лишь групповую корреляцию и не позволяющий связывать их с простыми плоскими поверхностями со скачкообразным изменением скоростей. Одна из основных особенностей волн ГСЗ заключается в том, что они формируются в динамически выразительные интерференционные пакеты на больших удалениях от пунктов взрыва (ПВ) при пологих сейсмических лучах. При наблюдениях вблизи ПВ, где можно было бы надеяться изучить глубинные границы на близвертикальных лучах, отражения от них, как правило, непрерывно прослеживать не удается. Лишь при более детальных наблюдениях МОВ вблизи ПВ вместо одной границы ГСЗ прослеживается серия разрозненных отражающих элемен-

тов, различающихся по глубине залегания и углам наклона. Сложный характер волн ГСЗ может быть следствием ряда причин: изменения рельефа и скорости вдоль границ; наличия в разрезе вместо простых границ переходных градиентных слоев или пачек относительно тонких слоев с параметрами, изменяющимися по латерали; влияния неоднородностей толщ, перекрывающих границы.

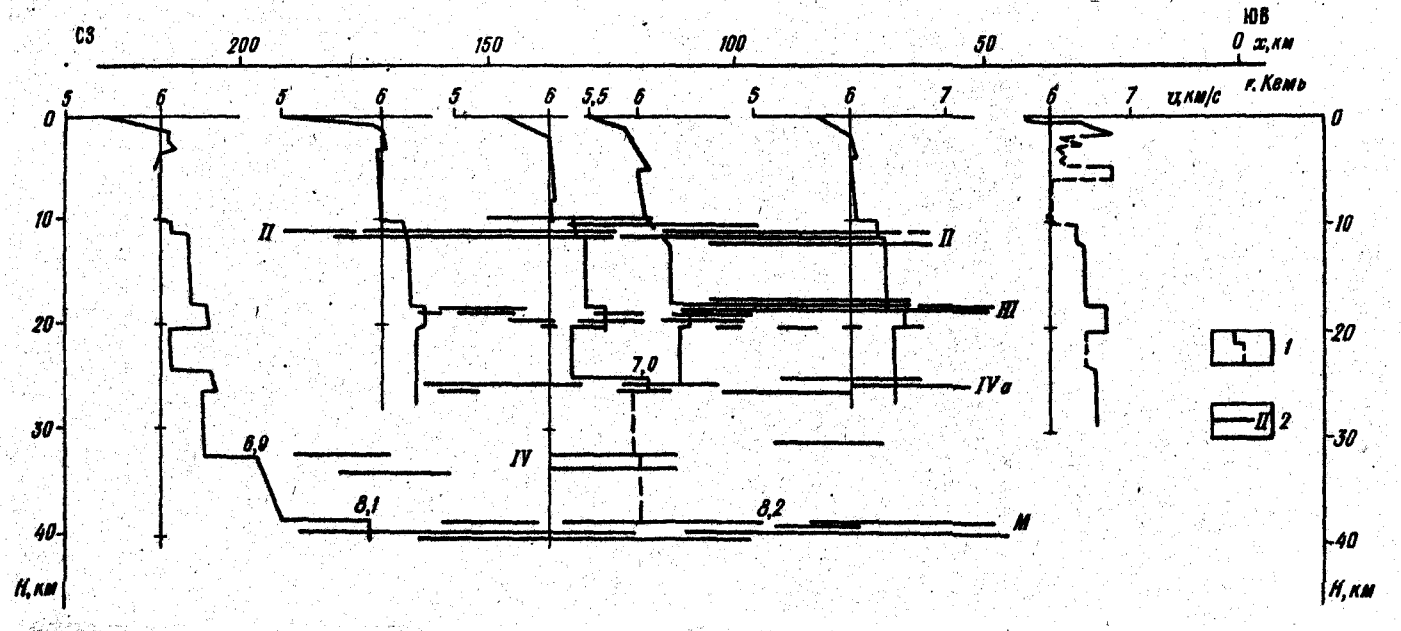
Большинство пологих сейсмических границ в коре щита не прослеживается непрерывно. После разрывов в корреляции теряются четкие критерии для отождествления волн, а следовательно и границ. Указанные обстоятельства в полной мере относятся к границам, которые, по традиции, можно было бы относить к поверхности так называемого «базальтового" слоя. Единственным критерием для выделения последнего является значение граничной скорости свыше 6,5 км/с. Однако этот параметр и динамические характеристики волн изменяются по латерали, в результате чего не только для всего Балтийского щита, но даже для отдельных профилей непрерывная корреляция «базальтового" слоя невозможна.

С накоплением новых фактических материалов более четко проявилось несоответствие между граничными скоростями для глубинных границ коры и значениями эффективной скорости, вычисленной для всей коры по волнам группы М. Если принять пластовые скорости равными граничным, то средняя скорость для коры, как правило, всегда оказывается большей, чем эффективная скорость, вычисленная по годографам волн группы М и равная обычно 6,35–6,45 км/с. Данное обстоятельство отрицает возможность использования толстослоистых моделей коры с увеличивающимися с глубиной пластовыми скоростями.

Характеристики наблюдаемых волн ГСЗ можно объяснить (при цифровом моделировании), связывая основные группы волн не с отдельными границами первого рода, а с высокоскоростными интервалами разреза (см. рисунок). Такие интервалы создают интенсивные пакеты различных волн: отраженных, квазиголовных и других. Высокоскоростные интервалы, наиболее ярко проявляясь в волновых полях ГСЗ, экранируют интервалы с относительно пониженными значениями скорости. Изучение последних затруднено даже при большой их мощности. Следовательно, волновые поля избирательно освещают разрезы коры, подчеркивая лишь высокоскоростные ее части, которые могут иметь сравнительно небольшую мощность. Разрешающая способность методов, как известно, определяется также соотношением изучаемых длин волн и мощностей слоев.

Сейсмические методы при изучении сложных сред обладают и другой избирательностью, обусловленной углами наклона различно ориентированных границ. Независимо от глубины залегания проще изучаются пологозалегающие границы. С увеличением глубин и углов падения границ прослеживание их затрудняется. Таким образом, даже МОВ, обладающий большими возможностями, неизбежно подчеркивает в разрезах коры на больших глубинах, главным образом, пологие элементы сейсмических границ [7].

Многочисленные исследования в лабораторных условиях физических свойств горных пород при различных термодинамических условиях показали, что значения скорости свыше 6,5 км/с присущи не только магматическим обра-



Сейсмический разрез земной коры для Центральной Карелии (профиль Кемь – Тулос)
1 – графики интервальной скорости по результатам моделирования; 2 – сейсмические горизонты и их индексы

зованиям основного состава, но и многим метаморфическим породам (амфиболитам, гранулитам и др.). Поэтому определение даже приближенного состава пород по значениям только одного физического параметра – скорости – не может быть однозначным. Предложенные вместо понятий «гранитного" и «базальтового" слоев понятия «гранито-гнейсовый" и «гранулито-базитовый" слои расширили возможные представления о составе пород консолидированной коры, но не устранили неоднозначности в интерпретации глубинных сейсмических границ.

На основании перечисленных сейсмических данных и с учетом результатов последних работ на Балтийском щите можно сделать следующие выводы, важные для интерпретации данных глубинных сейсмозондирований консолидированной коры материкового типа:

I. В геофизических моделях консолидированной коры имеются неоднородности разных масштабов. Модели коры имеют сложное строение. Установлено очень сильное влияние на упругие и другие физические свойства пород не только их состава, но и вторичных изменений горных пород, обусловленных процессами полиметаморфизма и наличием тектонизированных зон.

2. Доказано существование двух типов различно ориентированных сейсмических границ: «первичных" и «тектонических". Показано распространение их на большие глубины, что обосновывает возможности изучения глубинного строения сложных первичных структур, захватывающих весьма значительную часть консолидированной коры щита.

3. Получены важные данные для объяснения природы третьего типа сейсмических границ – пологих разделов, повсеместно выделяемых ГСЗ в коре. Эти разделы, по-видимому, связаны с определенными интервалами разреза, имеющими тонкую и сложную сейсмическую структуру с высокоскоростными, низкоскоростными и градиентными неоднородностями.

4. Данные ГСЗ указывают на возрастание и убывание с глубиной значений интервальных скоростей. Интервалы относительно пониженных скоростей могут быть обусловлены изменением состава пород, а также тектонизированными зонами, развивающимися вследствие разгрузки тангенциальных напряжений, существующих в коре. При этом совершенно не обязательно такие зоны-сколы связывать с большими горизонтальными смещениями.

5. Отказ от толстослоистых моделей коры лишний раз подчеркивает настоятельную необходимость изъятия терминов «гранитный" и «базальтовый" слои (или их аналогов). При сложном блоковом строении материковой коры таких слоев ГСЗ не устанавливает.

6. Сейсмические методы – основные при изучении консолидированной коры. С помощью низкочастотных модификаций – ГСЗ – определяются основные черты глубинного строения крупных блоков земной коры. Сложные структуры верхней части коры могут быть поэтапно детально изучены методом отраженных волн. При проведении сейсмических исследований необходимо учитывать их избирательность в отношении освещения сложных структур коры, связанную не только с используемыми длинами волн, но и с наличием экранирующих высокоскоростных неоднородностей и сложной геометрии границ.

7. Полученные результаты поставили новые вопросы изучения сложных структур консолидированной коры. К ним относятся моделирование не только слоистых сред, но и сред, включающих разномасштабные неоднородности различной конфигурации; исследование квазианизотропии коры; более тесное комплексирование сейсмических исследований с другими геофизическими методами.

Для решения этих задач необходимо дальнейшее продолжение геофизических и, в первую очередь, – сейсмических исследований на непрерывно совершенствующейся технологической основе в комплексе с другими методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Восточная часть Балтийского щита. Геология и глубинное строение / Под ред. К.О.Кратца. Л., Наука, 1975.

2. Геология и глубинное строение восточной части Балтийского щита / Под ред. К.О.Кратца. Л., Наука, 1968.

3. Грачев Ю.Н., Литвиненко И.В., Дехнич М.Я., Некрасова К.А. Глубинное сейсмическое зондирование на территории Балтийского щита. – В кн.: Сейсмические исследования, XII раздел программы МГГ. М., Изд-во АН СССР, 1960.

4. Земная кора восточной части Балтийского щита / Под ред. К.О.Кратца. Л., Наука, 1978.

5. Косминская И.П. Метод глубинного сейсмического зондирования земной коры и верхов мантии. М., Наука, 1968.

6. Литвиненко И.В. Особенности строения земной коры восточной части Балтийского щита. – В кн.: Международный геол. конгресс, XXII сессия. Доклады сов. геологов. М., Недра, 1965.

7. Литвиненко И.В. Методика изучения сейсморазведкой сложных структур верхней части консолидированной коры материков. – Зап. ЛГИ, 1971, т. 61, вып. 2.

8. Литвиненко И.В., Меламуд М.Е. Эффективность метода отраженных волн при рекогносцировочно-площадном изучении глубинного геологического строения Печенгской структуры. – Зап. ЛГИ, 1976, т. 69, вып. 2.

9. Павленкова Н.И. Волновые поля и модель земной коры (континентальной части). Киев, „Наукова думка", 1973.