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

УДК 550.834.32.015.013:681.3.06

СЕЙСМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРЕЗОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА

К.А.КАЛЬНИН, Л.Н.ПЛАТОНЕНКОВА

Глубинные сейсмические исследования (ГСЗ) в восточной части Балтийского щита выполнены совместными усилиями нескольких организаций (ПГО «Севзапгеология», ЛГИ и др.) под научным руководством профессора И.В.Литвиненко. Геолого-геофизические результаты работ опубликованы в ряде статей и монографий [3, 5, 7].

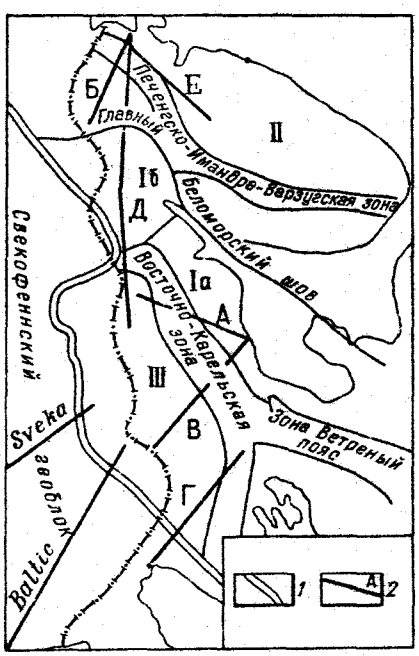


Рис.1. Схема расположения профилей ГСЗ на Балтийском щите
1 – граница Карело-Кольского геоблока; 2 – профили ГСЗ: Кемь – Ухта (А), Печенга – Ловно (Б), Кемь – Тулос (В), Лахденпохья – Сегозеро (Г), Печенгская губа – Костомукша (Д), Заполярный – Умбозеро (Е)
I–III – мегаблоки: Беломорский в Карелии (Iа) и на Кольском полуострове (Iб), Кольский (II) и Карельский (III)

Проблемная научно-исследовательская лаборатория геолого-геофизических исследований Балтийского щита в настоящее время обобщает материалы ГСЗ Карело-Кольского региона (рис.1) на основании сравнения волновых полей, наблюдаемых из пунктов взрыва (ПВ) на разных профилях. Выявлены устойчивые элементы волнового поля, определяющие сейсмогеологические условия, типичные для отдельных блоков, мегаблоков и всего Балтийского щита в целом. Интерпретация всех имеющихся данных выполняется по единой методике – способом численного моделирования сейсмических разрезов с использованием программ расчетов волн, основанных на методе нулевого лучевого приближения [8]. Решение обратной задачи сводится к определению сейсмических параметров среды: скорости продольных волн и положения сейсмических горизонтов, с которыми связана наиболее общая составляющая волновых полей.

Интерпретация материалов ГСЗ нередко неоднозначна, что объясняется, с одной стороны, дискретностью

применяемых в этом методе систем наблюдений, с другой стороны – сложностью наблюдаемых волновых полей. В составе последних присутствуют многочисленные отраженные и преломленные волны, приуроченные к разным сейсмическим границам: региональным, характерным для целых блоков и мегаблоков щита, и локальным, обусловленным контактами пород разного состава или отдельными зонами тектонических нарушений [6]. Однозначность количественной интерпретации на продольных профилях может быть гарантирована только для волн, распространяющихся в вертикальной плоскости, большинство из которых обязано своим существованием горизонтальным границам.

При определении сейсмических параметров земной коры на сейсмограммах рассматривают первые вступления и группы глубинных волн, стабильно наблюдаемые из многих ПВ на разных профилях. Одноименные группы волн отождествляют по принципу взаимной увязки, а также благодаря тому, что в ближней к ПВ зоне они имеют почти одинаковое время вступления, независимо от местоположения профиля. Точное совпадение, разумеется, невозможно, в частности из-за искажений, вносимых неоднородностью приповерхностной (от 0 до 3–5 км) части разреза.

Группы первых волн (первые вступления и примыкающие к ним волны) характеризуют верхнюю часть разреза как среду, в которой скорость меняется как по вертикали, так и по горизонтали в пределах от 5,5 до 6,7 км/с. Наиболее часто встречающееся в первых вступлениях значение кажущейся скорости $v^* = 6{,}2$ км/с определило выбор скорости редукции годографов волн, распространяющихся в земной коре.

При составлении сейсмических моделей верхнюю часть разреза можно условно представлять совокупностью горизонтально-слоистых блоков, каждому из которых присуща своя закономерность изменения скорости с глубиной $v_i = f_i(H)$. Такая совокупность является простейшим вариантом двумерной сейсмической модели $v = f(H, x)$, позволяющим во многих случаях рассчитать волны, по времени совпадающие с наблюдаемыми. Построение более сложных моделей необходимо в случаях, когда скорость распространения упругих волн вблизи дневной поверхности аномально велика, т.е. превышает среднюю скорость на 0,3–0,5 км/с. Основой для сейсмического моделирования волновых полей ГСЗ в подобных условиях в дальнейшем будут служить результаты комбинированных наблюдений ВСП–ГСЗ, которые в настоящее время ЛПИ проводит вблизи Кольской скважины [4].

Численное моделирование волнового поля, наблюдаемого в первых вступлениях вблизи пунктов взрыва (0–50 км), позволяет определить изменение скорости до глубины 3–4 км. К этой глубине на разных профилях бывают приурочены пологие отражающие границы.

Сейсмические модели более глубокого интервала верхней части земной коры (от 3–4 до 7–9 км) определяются по результатам подбора расчетных годографов для волн, наблюдаемых в первых вступлениях на расстоянии от 50 до 120 км от ПВ, и для соответствующих им отражений в последующих вступлениях. Этот интервал разреза целесообразно изучать сначала на безаномальных участках: области развития гнейсов в Центральной Карелии (профиль

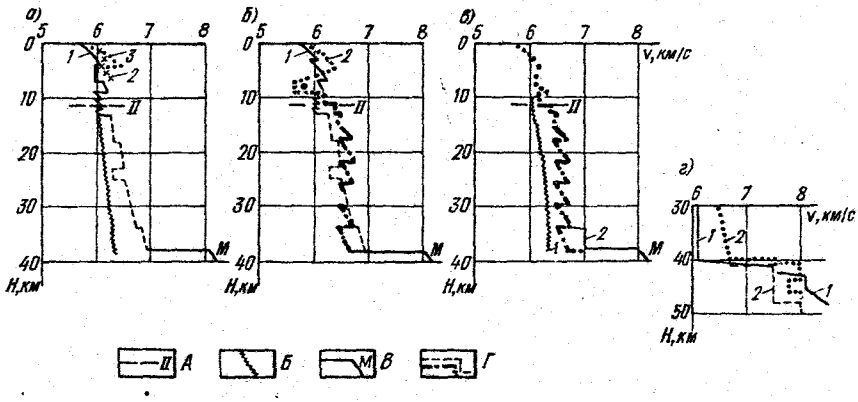


Рис.2. Сейсмические модели земной коры Балтийского щита: а – в Карелии (1 и 2 – Центрально- и Западно-Карельский блоки; 3 – Восточно-Карельская шов ая зона); б – Беломорский мегаблок в Карелии (1) и на Кольском полуострове (2); в – варианты модели области перехода кора-мантия; г – зона сочленения мегаблоков, Карельского со Свекофенским (1) и Беломорского с Карельским (2)
А – опорная сейсмическая граница; Б – изменения средней скорости с глубиной; В – граница Мохоровичича; Г – средние части разреза коры

Кемь – Тулос) и на Кольском полуострове (северная часть профиля Печенгская губа – Костомукша), – а затем переходить к моделированию разреза под объектами с большой (6,2-6,3 км/с) и аномально большой (6,4-6,7 км/с) скоростью вблизи поверхности. По результатам численного моделирования волновых полей ГСЗ значения интервальной скорости на глубине от 3-4 до 7-9 км не превышают 6,2-6,3 км/с ни в одном из блоков восточной части Балтийского щита (рис.2).

На разных профилях ГСЗ Балтийского щита нередко наблюдаются отраженные волны, связанные с границами на глубине около 7 км, в нижней части рассматриваемого интервала разреза.

Переход от верхней части земной коры к более глубокой ее части условно связан с группой глубинных волн II, наблюдаемой на многих профилях ГСЗ в восточной части Балтийского щита. В ближней к ПВ зоне (0-60 км) время вступления этой группы почти одинаково на разных профилях. Поэтому можно предполагать, что глубина сейсмической границы, соответствующей первым волнам группы II, меняется мало и что средняя скорость до нее устойчива. Возможно, что латеральная сейсмическая неоднородность, имеющая место вблизи дневной поверхности, частично или полностью компенсирована изменением скорости в слое над этой границей, на глубине от 4 до 10 км. Отражающие границы, относящиеся к горизонту II, на северо-западе Кольского полуострова находятся на глубине около 11 км, в Центральной Карелии – на глубине 10-12 км. В интервале глубин 9-13 км, содержащем горизонт II, скорость по латерали меняется в более узких пределах, чем вблизи дневной поверхности: на Кольском полуострове она, по-видимому, не больше 6,4 км/с, в Центральной Карелии – 6,2 км/с. О минимально возможных значениях скорости на этом уровне судить трудно, так как характеристики волноводов по наблюдениям

с поверхности неоднозначны; максимальные же значения скорости (большие, чем 6,3 км/с), как правило, определены по участкам годографов группы волн II, пересекающим положительные аномалии скорости вблизи дневной поверхности, и потому не могут быть с уверенностью отнесены к характеристике этого горизонта.

Вопрос о том, в какой степени кажущаяся скорость годографов глубинных волн обусловлена истинной скоростью на уровне соответствующей сейсмической границы, а в какой – скоростью в покрывающей среде, чаще всего остается открытым. Даже относительно плотная система наблюдений МОВ-ГСЗ на профиле Кемь – Тулос не обеспечила однозначного решения этого вопроса.

Сравнить сейсмические модели верхней части земной коры, построенные без учета и с учетом инверсии скорости, можно на примере составления разреза северной части профиля Печенгская губа – Костомукша, недалеко от которого находится Кольская сверхглубокая скважина. В первом варианте интерпретации, основанном только на данных ГСЗ, теоретические годографы (рис.3,а), сопоставимые с наблюдаемыми, были рассчитаны для среды, в которой скорость увеличивается от 5,5 км/с на поверхности земли до 6,5 км/с на глубине 13 км (рис.3,б, кривые 2). Во втором варианте при составлении сейсмической модели были учтены данные ВСП о скорости в Кольской сверхглубокой скважине на глубине более 7 км (рис.3,а и б, кривые 3).

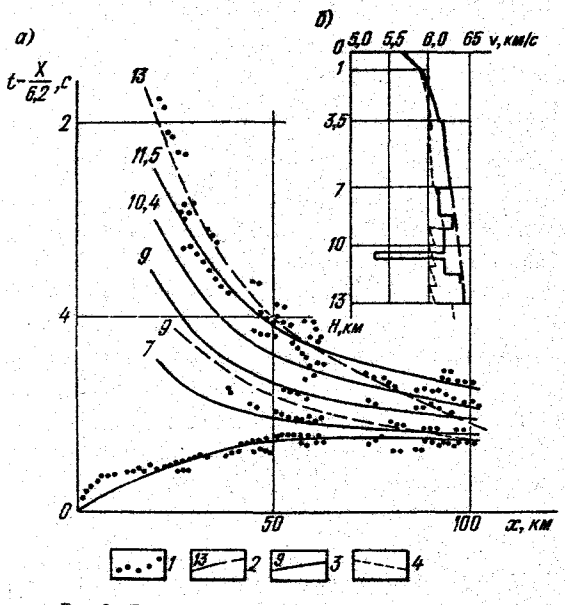


Рис.3. Волновое поле на профиле Печенгская губа – Костомукша: а – северная часть профиля; б – сейсмические модели
1 – наблюдаемое волновое поле; 2 и 3 – теоретические годографы отражений для Центрально-Кольского блока (указана глубина границы в километрах); 4 – график $v(H)$ для Центрально-Карельского блока

Значения скорости для интервала 7–12 км во втором варианте модели приблизительно на 0,2 км/с меньше, чем в первом; при этом соответствие между расчетными и наблюдаемыми годографами улучшилось (рис.3,а). Начало группы волн II в первом варианте обусловлено отражением от границы на глубине 13 км, во втором – отражением от границ на глубине около 11 км. Неоднозначность интерпретации в данном случае обусловлена наличием волновода над рассматриваемой границей. Возможно, что значения скорости, определяемые по данным ГСЗ, нередко оказываются больше реальных, так как по наблюдениям на дневной поверхности далеко не всегда удается установить наличие волноводов в земной коре, а тем более – оценить их параметры.

Сравнение сейсмических моделей профиля Кемь – Тулос (Центрально-Карельский блок Карельского мегаблока) и северной части профиля Печенгская губа – Костомукша (Центрально-Кольский блок Кольского мегаблока) показывает, что в обоих случаях на глубине от 7 км до II км значения скорости, в основном, находятся в пределах 6,I-6,2 км/с (рис.3,б). Это позволяет предположить, что сейсмические характеристики разрезов Кольского и Карельского мегаблоков в указанном интервале глубин однотипны.

На Балтийском щите продольные волны из верхней части коры наблюдаются на сейсмических записях как в последующих, так и в первых вступлениях, что позволяет интерпретировать их более или менее надежно.

Волны из более глубокой части коры находятся, в основном, в последующей части записи, поэтому их интерпретация менее однозначна. В волновом поле этому интервалу разреза соответствует область между группами волн П и М, в которой присутствуют обычно несколько опорных групп волн. Глубинные волны образуют устойчиво прослеживаемые группы на удалении более 50-70 км от ПВ. Вступления одноименных групп на разных профилях близки между собой по времени там, где они наблюдаются в ближней к ПВ зоне (до IOO км) и имеют годографы, характерные для отражений. Это позволяет предположить, что глубина соответствующих сейсмических границ и средняя скорость до них незначительно меняются в пределах исследованной части Балтийского щита. Сейсмические границы, на которых формируются опорные группы волн, по данным численного моделирования сосредоточены в трех интервалах разреза: $I8^{\pm}(I \div 2)$, $25^{\pm}(I \div 2)$ и $32^{\pm}(I \div 2)$ км.

В дальней от ПВ зоне вступления одноименных групп глубинных волн близки между собой в пределах крупных геоструктур: на профилях ГСЗ Кольского полуострова, и на профилях Карелии, но все „кольские" глубинные волны существенно опережают „карельские". Эта особенность учтена при определении интервальной скорости в средней части коры. По данным численного моделирования значения скорости в интервале I0-20 км в Карельском мегаблоке и в карельской части Беломорского мегаблока изменяются от 6,2 до 6,4 км/с, а в Кольском мегаблоке и в той части Беломорского мегаблока, что находится на Кольском полуострове, – от 6,4 до 6,6 км/с. В интервале 20-30 км скорость предположительно изменяется от 6,5 до 6,8 км/с во всем Карело-Кольском геоблоке (см. рис.2).

Не исключено, что относительно большие значения скорости на отдельных участках, характерные для верхней части коры Кольского полуострова и Карелии, наследуются глубинными волнами как подэкранными. В этом случае приведенные для средней части коры значения интервальной скорости могут оказаться завышенными.

Вопросы численного моделирования области перехода кора – мантия на Балтийском щите рассмотрены в специальных работах [I, 2]. Полученные результаты в общем виде показаны на рис.2.

Приведенные данные получены в результате первой попытки обобщения волновых полей ГСЗ в Карело-Кольском регионе. Численное моделирование использовалось на всех этапах обобщения: от выявления устойчивых групп волн

характеризующих мегаблоки и крупные блоки щита, до вычисления значений скорости и положения сейсмических горизонтов в разрезе земной коры. Для решения поставленных задач были разработаны некоторые специальные приемы моделирования. Основные проблемы моделирования обусловлены особенностями метода ГСЗ и сейсмогеологической характеристикой верхней части земной коры Балтийского щита. Дискретные линейные наблюдения ГСЗ проведены на профилях, пересекающих вкрест простирания крупнейшие геотектонические элементы щита с различными сейсмогеологическими условиями. Наибольшую трудность представляют задачи определения сейсмических параметров в интервалах разреза, находящихся под объектами с относительно большой скоростью. Корректному решению таких задач будут способствовать комбинированные наблюдения ВСП-ГСЗ, начатые Проблемной научно-исследовательской лабораторией геолого-геофизических исследований Балтийского щита под руководством И.В.Литвиненко в районе Кольской сверхглубокой скважины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гончаров А.Г. К расчету сейсмической модели нижней части земной коры и переходной зоны кора - мантия. - Зап. ЛГИ, 1932, т. 92, с. 10-14.

2. Гончаров А.Г. О возможной природе сейсмических волн от поверхности Мохоровичича на Балтийском щите. - Зап. ЛГИ, 1987, т. 113, с. 30-36.

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

4. Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины / Гл. ред. Е.А.Козловский. М., Недра, 1984. 490 с.

5. Литвиненко И.В. О некоторых результатах изучения глубинных разрезов земной коры различных структурно-фациальных зон Кольского полуострова и Карелии. - В кн.: Геология и глубинное строение восточной части Балтийского щита. Л., Недра, 1968, с. 185-190.

6. 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.

7. Литвиненко И.В., [illegible]нкудинов С.А., Дворецкая Л.Н. и др. Глубинный сейсмический разрез земной коры Приладожья и Юго-Западной Карелии. - Зап. ЛГИ, 1982, т. 92, с. 3-9.

8. 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., Недра, 1977. Т. 2, с. 173-222.