

Т. В. Покровская

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГЛУБИННОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ БАЛТИЙСКОГО РЕГИОНА

Глобальные динамические процессы, влияющие на эволюцию литосферы, являются причиной сильного различия по возрасту блоков современной литосферы континентов. Исследование литосферы в области Балтийского щита имеют большое значение для понимания развития и тектоники региона. Сейсмограммы отраженных и преломленных волн, полученные с помощью глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), помогают установить положение и характеристики отражающих границ в коре и верхней мантии, глубину и геометрические особенности границы Моховичича (Мохо).

Область данного исследования охватывает часть Балтийского моря между юго-востоком Швеции и севером Германии — бассейн так называемого Восточного моря. Расположение сейсмического профиля ГСЗ было выбрано таким образом, чтобы он пересекал Tornquist Zone — наиболее значительное и интересное европейское тектоническое образование — зону коллизии между стабильной Докембрийской областью Балтийского щита с северной стороны и более молодой Каледонийской областью с южной. Такое сочетание разновозрастных блоков указывает на сложный тектонический режим этого района. Данные глубинного сейсмического зондирования были получены в рамках международного проекта Basin'96, основной целью которого являлось исследование коры и верхней мантии бассейна Восточного моря, измерение толщины коры и особенностей положения границы Мохо, а также построение распределения скоростей сейсмических волн с глубиной.

Статья представляет результаты обработки и интерпретации данных ГСЗ, зарегистрированных на сейсмостанции, расположенной на юго-восточном побережье Швеции. Построен скоростной разрез вдоль профиля длиной около 250 км. Для обработки сейсмоданных применялись оригинальные методы статистической оптимизации, а также стандартные пакеты прикладных программ SierraSEIS и PROMAX. При построении скоростного разреза была использована программа быстрого прямого моделирования Rayinv основанная на лучевом методе, созданная канадским ученым С. А. Zelt. Наиболее трудоемким этапом обработки сейсмических данных была интерпретация разрывов в отражениях волн PmP от границы с мантией. На основании полученного скоростного разреза можно утверждать, что граница Мохо имеет ступень в области Tornquist Zone, что согласуется с результатами интерпретации данных ГСЗ профиля BABEL [1].

### Ранее проведенные исследования бассейна Балтийского моря

За последние 10–15 лет было проведено глубинное сейсмическое зондирование во многих областях Балтийского щита для выявления основных тектонических структур региона и определения строения и толщины коры. Среди наиболее известных проектов исследований Балтики и названий сейсмических профилей, расположенных в бассейне Балтийского моря, можно упомянуть следующие: FENNOLORA, SVEKA, BABEL, POLAR, BALTIC, BALTIC SEA и BLUE ROAD. Точное положение упомянутых сейсмических профилей ГСЗ, а также время и характер проведенных иссле-

дований указаны в работе [2]. Сейсмические данные и результаты их обработки, полученные с профилей SVEKA, BALTIC и POLAR, опубликованы U. Luosto и др. в 1984, 1985 и 1989 г. соответственно [3]. Результаты глубинного сейсмического зондирования, проведенного вдоль профиля FENNOLORA, отражены в работах Prodehl и Kaminski [4], а также Guggisberg и Berthelsen (1987). Проект BABEL стал наиболее масштабным на фоне других исследований как по характеру проведенных работ, так и по количеству участников. Над международным проектом BABEL работали ученые из 12 исследовательских институтов Великобритании, Дании, Финляндии, Германии и Швеции. Общая протяженность сейсмической линии BABEL составляет  $\approx 2270$  км. Результаты обработки сейсмических данных — скоростной разрез и геологическая интерпретация — опубликованы в 1993 и 1994 г. [1]. Сейсмическая линия BABEL наиболее близко расположена к профилю D2 (проект Basin'96), обработка и исследование которого составляют содержание данной работы. Поэтому целесообразным явилось сопоставление скоростных разрезов вдоль этих двух профилей.

### Расположение профилей ГСЗ

Данные глубинного сейсмического зондирования Восточного моря получены в рамках международного проекта Basin'96. Межконтинентальные бассейны имеют большое экономическое значение. Тем не менее процессы их формирования до конца не ясны. Бассейн Северного моря, как было недавно установлено, контролируется процессами расширения, в то время как юго-восточное продолжение этого бассейна, а именно Северо-Германский бассейн, обнаруживает свойства, несовместимые с простым расширением. Наблюдались, например, обширные гравиметрические и магнитные аномалии, разрывы в отражениях от Мохо, повторяющиеся инверсии, складчатость, признаки интенсивного раннего вулканизма. Целью проекта Basin'96 является анализ Северо-Германского бассейна от Балтийского моря до гор Harz, наземные и морские геофизические исследования Северной Германии и бассейна Восточного моря, включающие проведение масштабного глубинного сейсмического зондирования. В проекте участвуют 12 университетов и коммерческих компаний Германии, Дании и Швеции.

Глубинное сейсмическое зондирование бассейна Восточного моря производилось в апреле 1996 г. (ведущая организация — BGR, Hannover). Морские сейсмоданные получены вдоль девяти профилей общей протяженностью 800 км. Трехкомпонентная запись сейсмических данных велась на нескольких сейсмостанциях, расположенных на юге Швеции, Дании и севере Германии, а также на острове Борнхолм. На карте показано основное расположение сейсмических линий, вдоль которых проводилось ГСЗ, и сейсмостанций (рис. 1). Источник (airgun array) был расположен на глубине 7 м от поверхности моря. Этим можно пренебречь при интерпретации сейсмических данных, считая источник расположенным на поверхности. Временной интервал между взрывами составлял 30 с, длина сейсмической записи 26 с, шаг дискретизации при записи сейсмограммы 4 мс.

Исследуемый в данной работе сейсмический профиль ГСЗ соответствует сейсмической линии D2 на карте, пересекающей бассейн Восточного моря с северо-востока на юго-запад к западу от острова Борнхолм (см. рис. 1). Особенности геологического строения коры вдоль профиля указаны в работах [1, 5]. Из всех записей сейсмических данных с этого профиля была выбрана наилучшая, сделанная на сейсмостанции, расположенной на юго-восточном побережье Швеции. Велась трехкомпонентная запись сейсмических данных. Запись вертикальной компоненты была взята за основу при построении скоростного разреза для продольных волн вдоль профиля.



Рис. 1. Карта бассейна Восточного моря с указанием морских профилей ГСЗ и сейсмостанций.

### Обработка сейсмических данных

Сейсмический морской профиль D2 имеет протяженность около 250 км. Данные ГСЗ записывались на побережье Швеции, и расстояния от приемника до источника (оффсеты) менялись от 40 до 270 км. Сейсмические данные после записи конвертированы в SEG-Y формат. К данным профиля D2 применена стандартная процедура обработки с помощью промышленных пакетов прикладных программ, таких как SierraSEIS и PROMAX. Частотный анализ данных показал сильный максимум на частотах 6–7 Гц, поэтому к сейсмограмме была применена фильтрация в узком промежутке частот 5–9 Гц для подавления шума. Затем был произведен стэк (или суммирование) данных для дальнейшего увеличения отношения сигнал/помеха, нормировка амплитуды, выборка и сортировка трасс на эквидистантный оффсет. Нормировка амплитуды проводится для того, чтобы получить сравнимые значения амплитуд сейсмических волн для близких и удаленных взрывов. В сейсмических данных после фильтрации, стека и редуцирования времени для скорости 6 км/с вступления продольных волн выглядят более четкими. Формула для редуцированного времени  $t_1$ :

$$t_1 = t_0 - S/v_r,$$

где  $S$  — расстояние от источника до приемника,  $v_r = 6$  км/с. Такая же процедура редуцирования времени проводилась для скорости  $v_r = 8$  км/с при выделении на сейсмограмме Р-волн, отраженных и преломленных в нижней коре.

Хорошее отношение сигнал/помеха прослеживается на всей сейсмической секции, за исключением очень больших оффсетов (более 200 км). На сейсмограмме четко идентифицируются несколько типов продольных волн — прямая в верхней части коры, отраженная от границы между первым и вторым слоем, отраженная от Мохо и головная волны. Некоторые вступления не четко выражены, и понадобилась дополнительная обработка для их выявления. На удалениях от источника 48–85 км

прослеживается вступление прямой Р-волны в верхнем слое. Верхняя часть коры относительно плохо освещена на данной секции, и первое явно выраженное отражение соответствует границе на глубине 12 км (на сейсмической секции эта волна видна на удалениях от 75 до 110 км).

Рассматриваемые сейсмические данные не являются вертикальными, минимальное расстояние от источника до приемника равно 40 км, а максимальное — 250 км. Так что на сейсмограмме наиболее выражены рефрагированные волны и волны с большим углом отражения. Волна РmР, отраженная от границы с мантией, имеет максимальную амплитуду по сравнению с другими волнами на данной секции. Она хорошо прослеживается на удалениях от 90 до 170 км. В области между 110 и 150 км отражения от Мохо имеют комплексный характер с разрывами и смещениями. Это соответствует на местности прохождению профиля через Tornquist Zone — зону контакта двух блоков различного возраста, где строение коры и верхней мантии имеет сложный характер.

На удалениях более 170 км вступления могут быть проинтерпретированы двояко — как рефрагированные волны в нижней части коры или как отражения от Мохо. При моделировании скоростного разреза обе интерпретации дают один и тот же результат. Наиболее вероятно, однако, первое объяснение, хотя на таких удаленных расстояниях от источника различие между этими двумя фазами становится несущественным. Начиная с оффсета 185 км вступает головная волна, бегущая вдоль границы Мохо.

К участкам сейсмограммы, сложным для интерпретации из-за сильной интерференции сейсмических волн, была применена оригинальная методика разделения интерферирующих сигналов, основанная на методах статистической оптимизации. К ним относятся итерационный и генетический алгоритмы [6]. Итерационный алгоритм, предложенный В. Н. Трояном, базируется на методе максимального правдоподобия.

Основная идея итерационного алгоритма состоит в том, что для линейной аддитивной модели сейсмотрассы (сумма сейсмоволн и шума):

$$U_i = \sum_{\mu=1}^M A_{\mu} \varphi(t_i - \tau_{\mu}) + n_i,$$

где  $\varphi(t_i)$  — форма сейсмического импульса,  $A_{\mu}$  — амплитуды,  $\tau_{\mu}$  — времена вступления сейсмических волн,  $n_i$  — шум, оцениваются поэтапно параметры сейсмических волн (амплитуды и времена их прихода) так, что пакет интерферирующих волн распадается на отдельные вступления. На каждом этапе или итерации оцениваются параметры только одной волны, которая затем вычитается из сейсмотрассы. Дальнейшее выделение волн происходит с учетом параметров уже определенного сигнала. Амплитуда и время вступления волны на  $m$ -этапе работы алгоритма оценивается максимизацией функционала, являющегося функцией правдоподобия:

$$\lambda_m(\hat{A}_1, \hat{\tau}_1, \dots, A_m, \tau_m) = \sum_{i,j} R_{ij}^{-1} \left[ \hat{Y}_{im} \varphi(t_j - \tau_m) - \frac{1}{2} A_m^2 \varphi(t_i - \tau_m) \varphi(t_j - \tau_m) \right],$$

где 
$$\hat{Y}_{im} = U_i - \sum_{\mu=1}^{m-1} \hat{A}_{\mu} \varphi(t_i - \hat{\tau}_{\mu})$$

— сейсмограмма, из которой вычтены все ранее определенные волны;  $R_{ij}$  — это матрица ковариации шума. Разделение пакета интерферирующих волн происходит

пока удовлетворяется пороговое условие существования очередной выделенной волны на фоне шума.

Генетический алгоритм [7], предложенный Дж. Голландом в 1975 г., построен по аналогии с эволюционными процессами в природе, где выживают наиболее сильные и приспособленные организмы. Алгоритм предназначен для решения нелинейных задач оптимизации, когда из общего числа моделей определенным образом выбираются наилучшие. Каждая итерация состоит из трех шагов — воспроизводства, скрещивания и мутации. Алгоритм находит параметры интерферирующих волн путем максимизации функционала

$$F = \sum_{i=1}^J \{U_i - A\varphi(t_i - \tau)\}^2,$$

но процесс поиска оптимальных параметров происходит путем кодирования каждой возможной комбинации параметров (или модели) в бинарную цепочку. Алгоритм работает с несколькими моделями одновременно (что значительно ускоряет поиск) и, после проведения определенных комбинаторных операций, находит оптимальную из них, дающую значения амплитуд и времен прихода интерферирующих волн.

В итоге работы обоих алгоритмов вместо сложной интерференционной картины на сейсмограмме получается отфильтрованный участок с выделенными из интерференционного пакета отдельными вступлениями. Значительно облегчилась задача нахождения годографов на сложных участках секции, необходимых для построения модели. Применение дополнительных методов обработки дало возможность улучшить разрешение на сейсмограмме и тем самым повысить качество скоростного разреза вдоль профиля.

### Построение скоростного разреза

После обработки сейсмограммы и получения качественной секции были идентифицированы типы сейсмоволн и измерены значения времен прихода каждой волны в зависимости от расстояния от источника до приемника. Для построения скоростного разреза вдоль профиля была использована программа Rayinv, основанная на лучевом методе. Программа предназначена для быстрого прямого моделирования и обращения годографов отраженных, преломленных и головных волн. Вмещающая среда предполагается двумерной, изотропной с набором слоев, разделенных отражающими границами произвольной формы. Толщина слоев может быть различной и меняться в горизонтальном направлении. Скорость сейсмических волн в каждом слое задается дважды — у поверхности и у подошвы слоя, причем эти два значения могут не совпадать. Тем самым моделируется вертикальный градиент скорости. Для различных значений оффсетов скорость также может быть разная, что позволяет моделировать горизонтальный градиент скорости. Таким образом, программа позволяет моделировать среду, составленную из слоев любой конфигурации и мощности с произвольным распределением скоростей сейсмоволн. Rayinv допускает работу с любым типом волн — прямыми, поверхностными, отраженными, преломленными и головными. При этом каждая из волн может иметь кратные отражения, отражения от поверхности земли, переходить из продольной фазы в поперечную, и так далее. Программа создает графическое изображение траекторий сейсмических лучей в земле и вычисляет годографы всех типов волн. Определение пути каждой из волн в земле происходит в соответствии с численным решением волнового уравнения для двумерной среды. Входными данными для Rayinv являются годографы всех

типов волн, четко видных на сейсмограмме, и первое приближение скоростного разреза с указанием положения границ и скоростей в слоях. Главным вопросом оценки скоростей в земле является критерий, по которому выбирается лучшая скоростная модель. Непосредственным способом определения правильной модели является использование разницы между наблюдаемыми и вычисляемыми временами вступления сейсмических волн. Если это различие существенно, то модель распределения скоростей корректируется в соответствии со знаниями и интуицией интерпретатора.

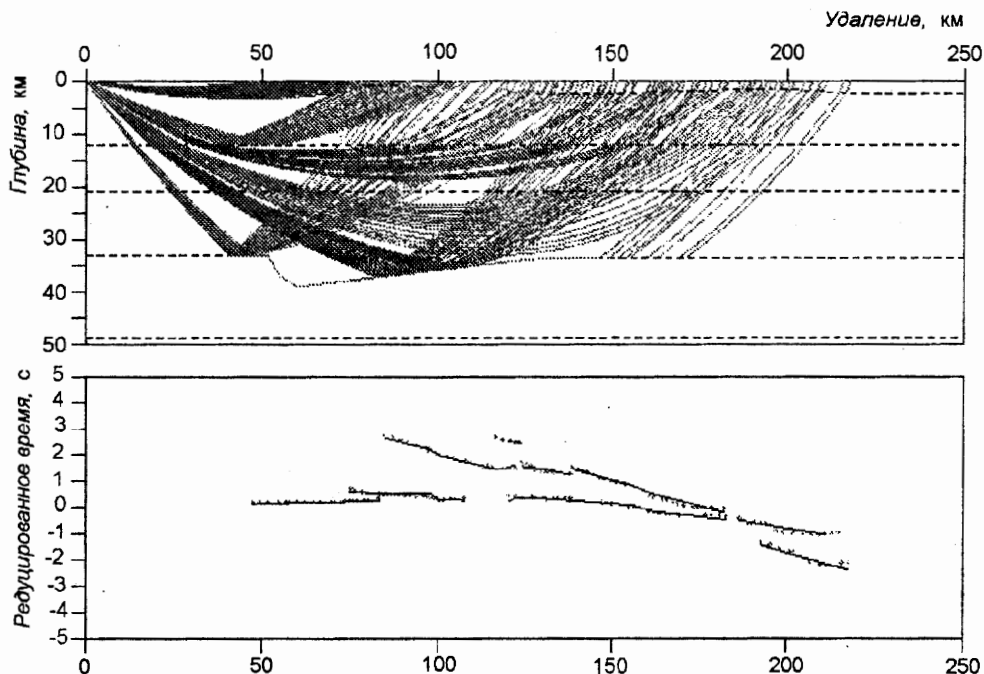


Рис. 2. Прямое моделирование с помощью программы Rayinv.

На рис. 2 показан результат прямого моделирования с помощью программы Rayinv. В верхней части рисунка изображено прохождение в земле лучей, соответствующих различным типам продольных волн. Богатая волновая картина указывает на хорошее качество зарегистрированных и обработанных сейсмоданных. В нижней части рисунка показаны наблюдаемые (в виде точек) и расчетные (в виде линий) годографы всех фаз продольных волн, которые практически совпадают друг с другом. Это означает, что построенная модель близка к истинному распределению скоростей и положению слоев в земле.

Результирующая двумерная скоростная модель вдоль профиля представлена на рис. 3. Первый слой разреза (I) соответствует чехлу осадочных пород со скоростями продольных волн от 3 до 3,5 км/с. Мощность слоя осадков колеблется от 0,2 до 2,5 км.

Наиболее ярко выраженная на сейсмоданных отражающая граница находится на глубине 12 км. Скорость продольных волн в слое II меняется с глубиной и составляет 5,95 км/с на глубине 3 км, в то время как у подошвы слоя она возрастает до 6,2 км/с. Следующий значительный по мощности слой можно условно разделить на

две части (III и IV) — среднюю (от 12 до 21 км) и нижнюю (от 21 км до границы Мохо). Такое разделение имеет смысл из-за различия градиентов скорости в средней и нижней коре. Сразу под границей раздела на глубине 12 км скорость равна 6,4 км/с, а на границе с нижней корой — 6,6 км/с. Далее градиент скорости продольных волн возрастает более чем в два раза, и у границы Мохо скорость равна 7–7,2 км/с. В верхней мантии (V) скорость продольных волн составляет 8 км/с.

Граница Мохо имеет ярко выраженную ступень (или провал) на удалениях от 60 до 100 км, где ее глубина меняется с 33 до 39 км. На этом участке обнаруживается горизонтальный градиент скорости от 7 до 7,2 км/с в направлении увеличения расстояния от источника до приемника. Резкое изменение глубины границы с мантией соответствует пересечению сейсмическим профилем области контакта двух разновозрастных блоков Балтийского щита, известной под названием Tornquist Zone.

Глубинное сейсмическое зондирование Балтийского щита, таким образом, дает интересную информацию о структуре земной коры в этом регионе. Комбинирование стандартных методов обработки сейсмических данных с оригинальными методами статистической оптимизации, примененными при разделении интерференции сейсмоволн, значительно улучшает разрешенность сейсмограммы, что важно при построении качественного скоростного разреза.

Построенная вдоль профиля двумерная модель земной коры позволяет утверждать, что толщина коры меняется с 33 км на северо-востоке до 39 км в центральной части профиля и плавно уменьшается до 34–35 км на юго-западе профиля. Граница Мохо имеет значительную ступень или разрыв высотой 6 км в области Tornquist Zone, что согласуется с результатами интерпретации данных профиля BABEL [1]. Эта ступень, по всей видимости, имеет структуру, сформированную тектоническим движением блоков Балтийского щита. Скорость продольных волн растет с глубиной до 7,2 км/с на глубине границы с мантией. Сейсмоданные указывают на наличие отражающей границы на глубине 12 км, а также на увеличение градиента скорости в нижней части коры.

Будущие исследования должны быть направлены на улучшение качества скоростного разреза путем учета горизонтальной компоненты и данных, записанных другими сеймостанциями, а также на создание модели распределения скоростей в среде для поперечных волн.

#### Указатель литературы

1. BABEL Working Group. Deep seismic reflection/refraction interpretation of crustal structure BABEL profiles A and B in the southern Baltic Sea // *Geophys. J. Int.* 1993. Vol. 112. N 3. P. 325–343.
2. Ostrovsky A. A., Flueh E. R., Luosto U. Deep seismic structure of the Earth's crust along the Baltic Sea profile // *Tectonophysics.* 1994. N 233. P. 279–292.
3. Luosto U., Flueh E. R., Lund C.-E. and Working Group. The crustal structure along the

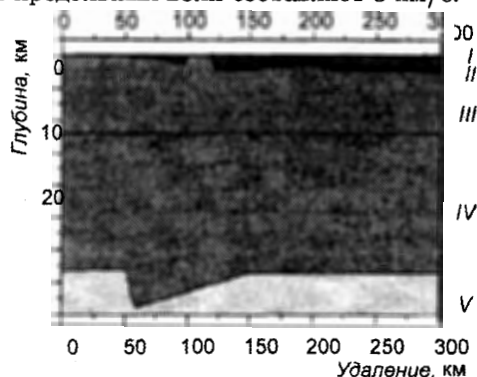


Рис. 3. Скоростной разрез для продольных волн вдоль профиля D2.

- Polar Profile from seismic refraction investigation // *Tectonophysics*. 1989. N 162. P. 51–85.
4. *Prodehl C., Kaminski W.* Crustal structure under the Fennolora Profile // Proc. 1st EGT Workshop: the northern segment European Science Foundation. Strasbourg, 1984. P. 43–48.
  5. *Erlstrom M., Thomas S. A., Deeks N., Sivhed U.* Structure and tectonic evolution of the Tornquist Zone and adjacent sedimentary basins in Scania and the southern Baltic Sea area // *Tectonophysics*. 1997. N 271. P. 191–215.
  6. *Покровская Т. В., Троян В. Н.* Методы оценки параметров интерферирующих сейсмических волн // *Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. Физика и химия*. 1997. Т. 2. № 1.
  7. *Holland J. H.* *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press. Ann Arbor, 1975.

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Swedish Institute и Nordic Council of Ministers (Nordic Scholarship Scheme for the Baltic countries and Northwest Russia) в Геоцентре Уппсальского университета в Швеции (Uppsala, Sweden).

Автор выражает глубокую признательность профессору СПбГУ В. Н. Трояну и профессору Уппсальского университета С.-Е. Lund за научное руководство и поддержку.