Записки Санкт-Петербургского горного института им. Г.В.Плеханова.
1992. Т. 135

УДК 550.834

И.Я.АЗБЕЛЬ, А.В.ЕГОРКИН,
В.Т.ЙОНКИС, Л.И.КАГАЛОВА

ОСОБЕННОСТИ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ КОРЫ ВДОЛЬ ПРОФИЛЯ НИКЕЛЬ - УМБОЗЕРО - РУЧЬИ

Изучение строения коры и верхней мантии различных тектонических зон Балтийского щита [2, 3, 7-10] и получение типовых моделей для разновозрастных провинций древнейшей консолидированной коры - таково основное направление сейсмических исследований, проводимых в регионе в последнее десятилетие и осуществляемых в рамках отечественных и международных проектов.

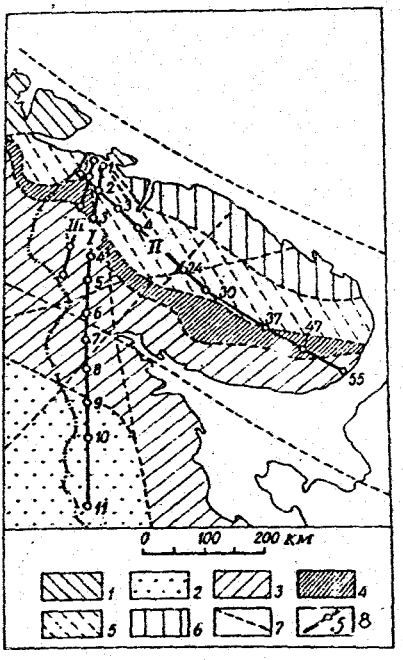


Рис.1. Схема расположения профилей ГСЗ на территории Кольского полуострова и Карелии
I, II и III - профили Печенга - Ковдор - Костомукша, Печенга - Умбозеро - Ручьи и Печенга - Ловно соответственно; 1 - каледониды; 2 - Лапландско-Карельский гранулитовый комплекс; 3 - Беломорский блок; 4 - Печенга-Варзугская тектоническая зона; 5 - Кола-Норвежская тектоническая зона; 6 - Мурманский блок; 7 - границы провинций и тектонические нарушения; 8 - ПВ и их номера

В статье дан анализ наблюдений, полученных в 1984 г. на профиле Никель - Умбозеро - Ручьи (СРГЭ "Нефтегеофизика"), которые сопоставлены с результатами ранее выполненных работ.

Западная часть профиля Никель - Умбозеро - Ручьи, пересекающего Кольский полуостров в широтном направлении и выполненного партией 35 СРГЭ НПО "Нефтегеофизика" в 1984 г., практически совпадает с профилем Никель - Умбозеро, отработанным ПГО "Севзапгеология" в 1973 г. (рис.1). Близкие системы наблюдений на профилях при существенно различных способах регистрации позволили значительно расширить возможности анализа волновых полей и более уверенно идентифицировать группы волн как в первых, так и в последующих вступлениях.

Регистрация на профиле 1983 г. осуществлялась 24-канальными станциями СМП и СМОВ в диапазоне частот 5-25 Гц. Расстояние между станциями составляло 2-4 км. Длина интервала регистрации одной станцией, равная 4,6 км, облегчала фазовую корреляцию опорных волн, что позволяло по-

ть оценки их кажущихся скоростей. Выделение опорных волн в первых и едующих вступлениях выполнялось визуально по аналоговым записям стан-. По кинематическим и динамическим признакам были выделены пять групп .

Общая длина профиля Никель - Умбозеро - Ручьи (1984 г.) составила км, максимальная длина годографа 250 км. Регистрация осуществлялась хкомпонентными станциями „Черепаха-М" с сейсмоприемниками СК-ІП (диа-он частот I-I0 Гц), расположенными примерно через 8-I0 км. Расстояние ду пунктами взрыва (их было девять) составляло 70-90 км. Полученные иси были оцифрованы и введены в ЭВМ БЦ СРГЭ для построения монтажей и реляционного анализа.

Первые волны. Качество записей первых волн различно для зных участков профиля и выделение их затруднено из-за высокого фона по-. Как правило, первые вступления четко регистрируются до удалений, превышающих I00 км от источника, менее уверенно для интервала I50-200 км.

Сводный годограф (рис.2) дает представление о характере изменения вре-н прихода первых волн и кажущихся скоростей для всех пунктов взрывов (ПВ) обоих профилях в зависимости от расстояния. Времена прихода волн, зарегистрированных вдоль общей части профилей, различаются незначительно (в пре-лах 0,I-0,3 с), хотя наблюдается некоторое систематическое опережение по емени волн, зарегистрированных на профиле I984 г., причина которого,

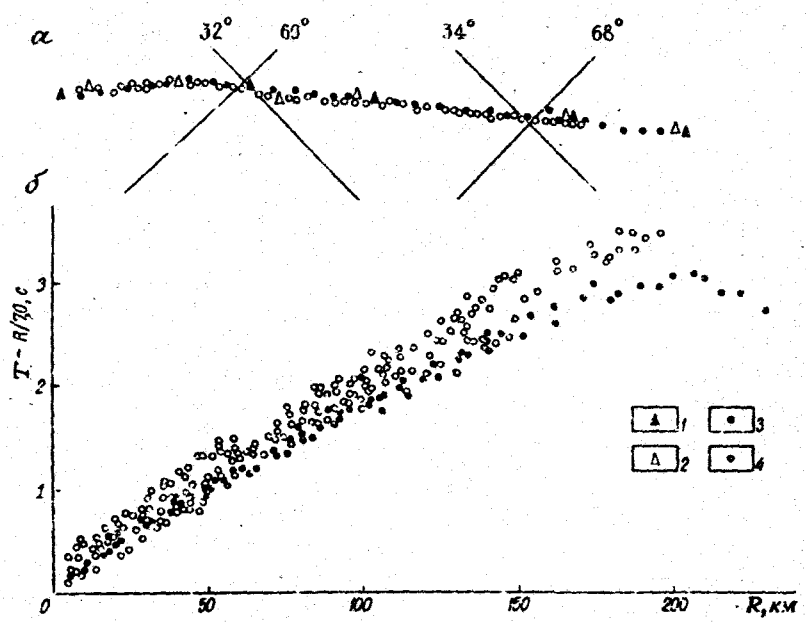


Рис.2. Схема отработки профилей (а) и сводный годограф волн, зарегистрированных в первых вступлениях (б)

1 и 2 - пункты взрыва на профилях Печенга - Умбозеро - Ручьи и Никель - Умбозеро соответственно; 3 и 4 - времена прихода первых волн в точки наблюдения на профиле Печенга - Умбозеро - Ручьи и Никель - Умбозеро соответственно

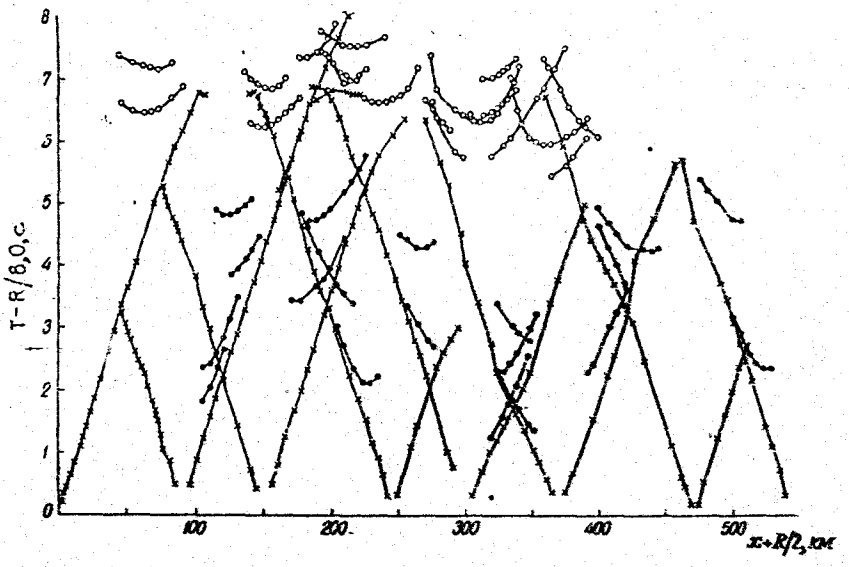


Рис.3. Система редуцированных годографов первых и последующих вступлений на профиле Никель – Умбозеро – Ручьи

возможно, связана с большей величиной зарядов и характеристиками аппаратуры.

На Кольском участке профиля 1984 г. была получена система из 15 взаимоувязанных годографов первых вступлений (рис.3). Максимальный интервал прослеживания 200 км, минимальный 80 км. Общая закономерность – плавное увеличение кажущейся скорости от 5,6 до 6,5 км/с без изломов вплоть до расстояний от источника около 200 км. Наиболее резкие изменения скорости отмечены на протяжении первых 35–40 км (от 5,6 до 6,2 км/с, иногда 6,7 км/с), что говорит о значительном вертикальном градиенте скорости в верхней части разреза. Непараллельность нагоняющих годографов на этих участках при расстоянии между ПВ, равном 80 км, достигает 0,03 с/км. При удалении от источников свыше 40 км скорость растет существенно медленнее и годографы до удаления $R = 160 \div 170$ км прямолинейны.

Сопоставление годографов показало, что их формы для северо-западной (0–300 км) и восточной (300–550 км) частей резко различны. Так, годографы, полученные в интервале профиля 0–300 км, имеют максимальную длину 200–230 км и в целом могут быть охарактеризованы средним значением кажущейся скорости на прямолинейных участках ($R = 40 \div 170$ км) около 6,2–6,5 км/с. Начиная с $R = 195 \div 205$ км, в первых вступлениях из ПВ 0 и ПВ 9 (при наблюдениях на юг) и из ПВ 24 (при наблюдениях на север) зарегистрированы волны $P^{M}_{прел}$ с интервалом прослеживания 30–40 км. Годографы из ПВ от 30-го до 55-го имеют в целом более высокие кажущиеся скорости и более дифференцированы по ним, что отражает значительную контрастность среды по упругим свойствам. В первых вступлениях из ПВ 30 (при наблюдениях на юг) и ПВ 37 (при наблюдениях на юг и на север), начиная с $R = 10 \div 20$ км, зарегистрирована

еломленная волна с $v^* = 6{,}6 \div 7{,}0$ км/с, связанная, видимо, с кровлей астовой Панской интрузии ультраосновных пород, картируемых на поверхнос-. Из ПВ 24 (при наблюдениях на юг) и ПВ 47 (при наблюдениях на север) по-чены нагоняющие годографы этой волны с $v^* = 6{,}8 \div 7{,}0$ км/с на интервалах ослеживания 65–115 и 95–165 км соответственно.

Практически полное совпадение встречных годографов из этих ПВ свиде-ельствует о том, что высокоскоростная зона прослеживается почти с поверх-ости и имеет конфигурацию, симметричную относительно ПВ 30 и ПВ 37. Для ценки глубины залегания этой зоны были использованы и нагоняющие годогра-ы из ПВ 47 и ПВ 24, имеющие отмеченные выше особенности времен прихода олн на интервале между ПВ 30 и ПВ 37.

Отличительной особенностью системы отработки профиля 1984 г. является егистрация первых мантийных волн с кажущимися скоростями $v^* \simeq 8{,}0$ км/с из ПВ 0, ПВ 9, ПВ 37 и ПВ 47, и,хотя интервал их прослеживания, как правило, не превосходит 20–40 км (рис.3), сам факт их регистрации позволяет ценить такой важный параметр,как время в точке пересечения коровой и мантийной ветвей годографов первых волн ($t_м = 6{,}8$ с при $v_{ред} = 8{,}0$ км/с), и определить скорости под зоной перехода кора – мантия.

П р о д о л ь н ы е о т р а ж е н н ы е в о л н ы. Для более уверенного прослеживания продольных и поперечных волн, зарегистрированных в последующих вступлениях, использовались как монтажи Z-каналов, так и монтажи трасс, являющихся результатом частотной фильтрации и фильтрации по эффективным скоростям (адаптивная скоростная фильтрация) [1, 4]. Записи последующих вступлений на Z-приборах представляют собой протяженные интерференционные колебания. Выделение на сейсмограммах волн, которые мало отличаются от общего фона записи, весьма условно при дискретных наблюдениях, поэтому коррелировались только очевидные фазы с характерными динамическими признаками.

Преимущества совместного применения частотного и скоростного фильтров видны из анализа сейсмограмм (рис.4). Как видно на рис.4,а, корреляцию последующих вступлений нельзя осуществить на исходных сейсмограммах, зарегистрированных станцией АСС-6/12 (открытый канал) на северо-западном участке профиля, где выполнялись детальные наблюдения с шагом между приемниками 0,25 км. Записи приведены через 1 км, с таким же шагом осуществлялось суммирование. Общая длина базы суммирования менялась от 40 до 60 км для коровых волн и от 60 до 90 км для мантийных. Окно суммирования было принято равным 0,6 с, обрабатывался временной интервал 20 с от первых вступлений. Оси синфазности относились к регулярной волне, если корреляция возможна на пяти и более трассах.

Волновая картина становится более четкой после частотной фильтрации с полосой пропускания 1,8–6,3 Гц (рис.4,б). При скоростной фильтрации суммировалось по пять и девять трасс (рис.4, в и г). Совместное использование частотного и скоростного фильтров позволяет уверенно трассировать волну,отраженную от границы $P^M_{отр}$, а увеличение числа суммируемых каналов до девяти особых улучшений не дает. При корреляции по монтажам на выходе

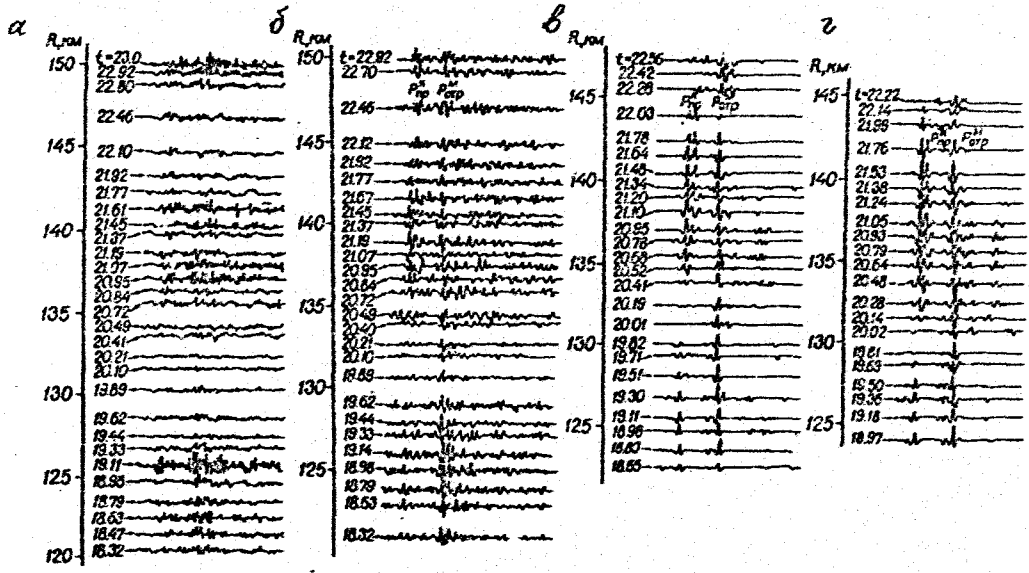


Рис.4. Примеры монтажей сейсмограмм для ПВ 15: а – открытый канал (0,5–20 Гц); б – на выходе частотного фильтра (1,8–6,3 Гц); в и г – на выходе частотного и скоростного (6,5–6,8 км/с) фильтра при суммировании соответственно пяти и девяти каналов

адаптивного фильтра область прослеживания волны $P^{M}_{отр}$ увеличивается по сравнению с визуальной обработкой (как правило, в сторону меньших расстояний от ПВ).

Компактная форма записи волны $P^{M}_{отр}$ характерна для северо-западной части профиля (0–250 км) и для юго-восточного участка (370–550 км). В средней части профиля (270–370 км) волна $P^{M}_{отр}$ представлена пакетом осей синфазности, имеющих близкие кажущиеся скорости. Иногда прослеживаются отдельные оси, иногда сложные интерференционные группы, внутри которых возможна фазовая корреляция на протяжении нескольких десятков километров. Для волн $P^{M}_{отр}$ получена взаимоувязанная система годографов (см. рис.3).

Интенсивность $P^{M}_{отр}$ сложным образом меняется с расстоянием, однако почти везде отмечается резкое уменьшение амплитуды $P^{M}_{отр}$ при $R =$ $= 160 \div 180$ км. Волны, отраженные от внутрикоровых границ, на монтажах адаптивного фильтра образуют одиночные оси, не всегда увязанные во взаимных точках.

Характер прослеживаемости волн $P^{K}_{отр}$ определяется внутренним строением коры, степенью ее раздробленности и соотношением размеров отдельных блоков с длиной взрывного интервала. Так, в пределах Центрально-Кольского антиклинория и Терской глыбы архейского фундамента первой доминирующей по интенсивности волной является $P^{K}_{отр}$, которая прослеживается в интервале 30–100 км от ПВ на временах 6–18 с и имеет асимптотические значения $v^{*} =$ $= 6{,}2 \div 6{,}4$ км/с. В пределах Имандра-Варзугского грабена на тех же временах в интервале 35–90 км от ПВ выделена волна $P^{K}_{отр}$, видимо, отраженная от подошвы Панской ультраосновной интрузии.

На эпицентральных расстояниях 35–170 км трассируется $P^{K}_{отр}$ в интервале по времени 8–27 с значительной интенсивности.

Поле поперечных волн. Отличительной особенностью волновых полей, зарегистрированных на Балтийском щите, является обилие интенсивных последующих вступлений поперечных волн. Корреляция первых S-волн проводилась по монтажам исходных сейсмограмм и суммотрасс после адаптивной фильтрации; отраженные S-волны трассировались только по монтажам суммотрасс после скоростной фильтрации. Правильность корреляции и идентификации волн контролировалась по временам прихода во взаимные точки и, по возможности, по нагоняющим годографам.

Поперечная слабофрагментированная волна $S^{K}_{пр}$ зарегистрирована из большинства ПВ до расстояний 130–210 км. Наибольшую кривизну имеют годографы вблизи источника до 40 км, где v^{*} быстро и плавно нарастает от 3,4 до 3,65–3,7 км/с. На больших удалениях годограф становится почти прямолинейным. Соотношение нагоняющих годографов аналогично таковому для волны $P^{K}_{пр}$.

Визуальная корреляция не обеспечивала протяженного трассирования волны, связанной с разделом М. Только на монтажах суммотрасс в варианте прямолинейного суммирования из ПВ 0, ПВ 9 и ПВ 47 удалось выделить и проследить первые вступления преломленных волн $S^{M}_{пр}$:

ПВ	Расстояние от ПВ, км	v^{*}, км/с
0	195–260	5,04–4,95
9	190–310	4,85–4,88
47	300–400	4,85–4,87

Встречные годографы из ПВ 9 и ПВ 47 хорошо увязаны во взаимных точках. Полученные годографы $S^{M}_{пр}$ использовались только для оценки граничной скорости, поскольку область прослеживания волны существенно меньше расстояния между ПВ, равного 380 км. Нагоняющие годографы из ПВ 0 и ПВ 9 почти не перекрываются. При корреляции отраженных S-волн наиболее информативными были вертикальная (z) и горизонтальная (y), перпендикулярная линии профиля, компоненты.

Наибольшей интенсивностью и самыми протяженными годографами характеризуется волна $S^{M}_{отр}$, отраженная от границы М. По ее годографам гораздо лучше, чем по волнам $P^{M}_{отр}$, выделяются участки резкого изменения глубины зоны перехода кора – мантия. Ярким примером этого могут служить годографы $P^{M}_{отр}$ и $S^{M}_{отр}$, полученные из ПВ 15 и ПВ 47.

Группа волн $S^{K_2}_{отр}$, образовавшихся на внутрикоровых границах, выделена почти по всему профилю. Кажущаяся скорость v^{*}_{S} меняется от 6,0 до 3,7 км/с на интервале 50–150 км от ПВ. Система годографов S-волн приведена на рис.5 в редукции 4,62 км/с, соответствующей $v_P/v_S = 1{,}73$ и $v_P = 8{,}0$ км/с, что позволяет выполнять прямое сопоставление годографов.

Структурные построения внутрикоровых границ и зоны перехода были выполнены на основе пересчета фрагментов отраженных P- и S-волн, выделяемых в последующих вступлениях, в отражающие элементы и последующего численного моделирования. При конструировании модели среды, которая была

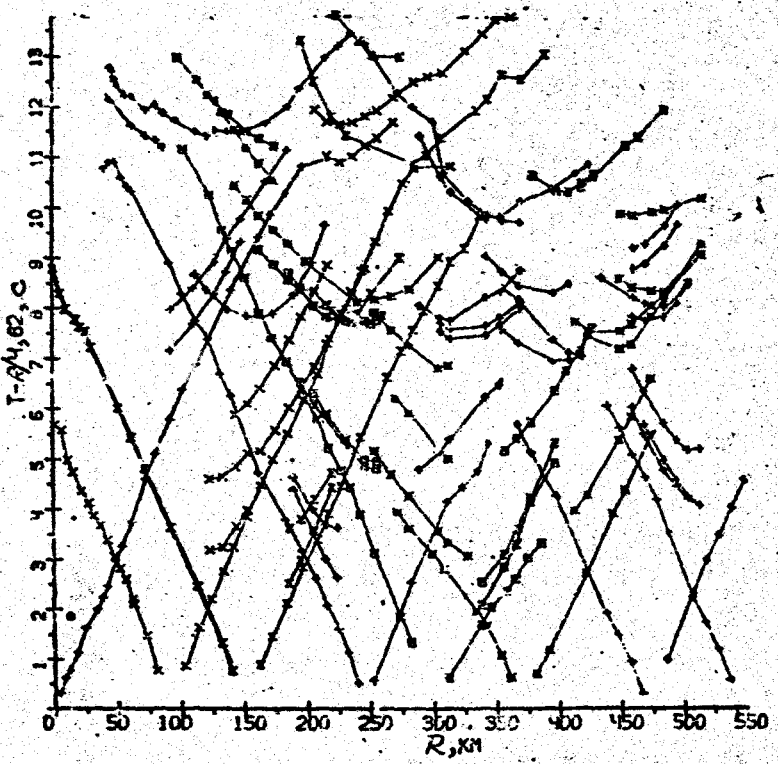


Рис.3. Система годографов S-волн

определена коллективом интерпретаторов под руководством А.В.Егоркина, совместно использовались кинематические характеристики продольных, поперечных и обменных волн [5].

Мы использовали основные структурные элементы модели для изучения и сопоставления динамических характеристик продольных волн путем моделирования синтетических сейсмограмм, которые можно сравнивать непосредственно с исходными монтажами. Особое внимание уделялось сопоставлению амплитуд волн, отраженных от кровли и подошвы слоев пониженной скорости. Интенсивность волн рассчитывалась в рамках нулевого приближения лучевого метода по программе [6], адаптированной на ЭВМ ЕС-1045 в ВЦ Кольского научного центра АН СССР.

Примеры вычислений для ПВ 9 даны на рис.6. Показаны лучевые траектории (рис.6,в) рефрагированных и отраженных волн и синтетические сейсмограммы (рис.6,б). Нормировка синтетических сейсмограмм (рис.6,б) проведена по максимальной величине смещения на каждой трассе и поэтому зависимость изменения амплитуд с расстоянием искажена. В то же время на одной трассе можно сопоставлять интенсивность различных волн, выходящих в заданной точке, и выделять зоны интерференции волн различной природы. Приведенная синтетическая сейсмограмма построена по годографам и амплитудам отраженных

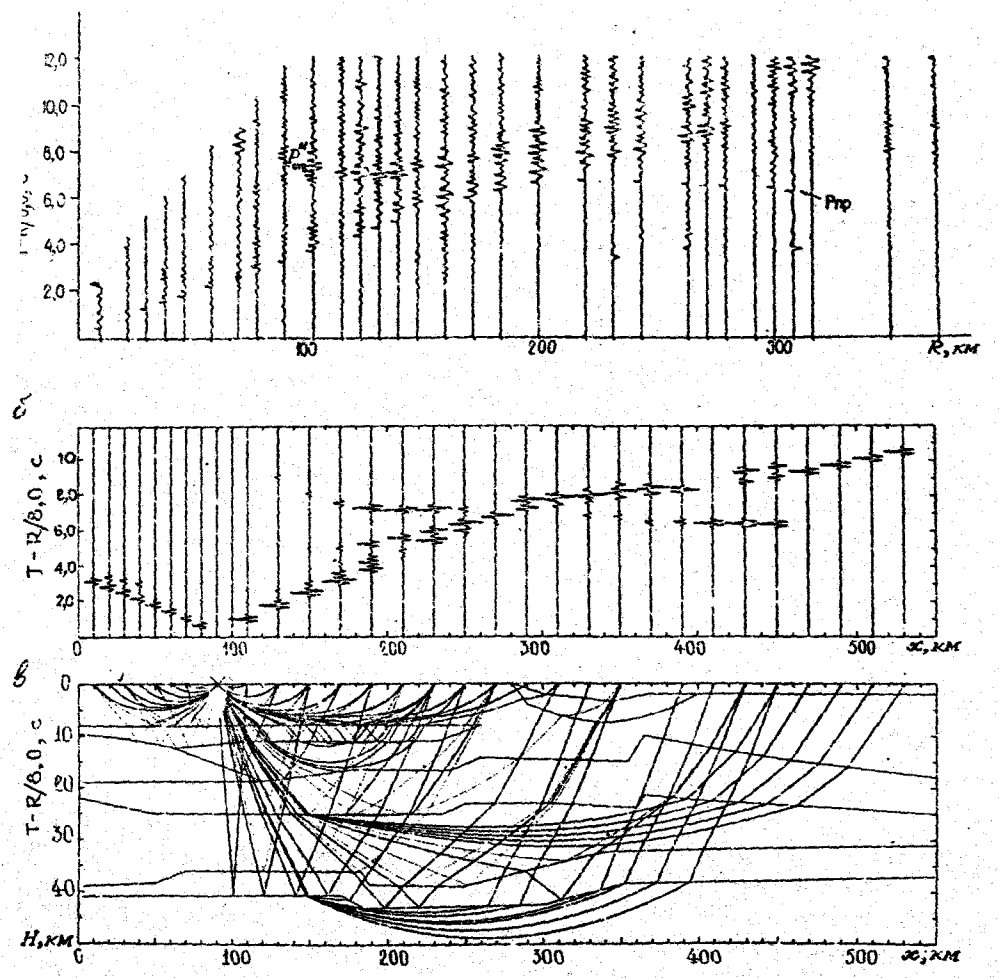


Рис.6. Экспериментальные (а) и теоретические (б) сейсмограммы для ПВ 8 и соответствующая сейсмическая модель (в)

и преломленных волн (рис.7). Если рассматривать только времена прихода волны, то, например, годографы волн, отраженных от кровли и подошвы слоя пониженной скорости, в переходной зоне кора – мантия имеют практически одинаковый интервал прослеживания. Сопоставление амплитуд этих волн показывает различие в их интенсивности более чем на порядок, поэтому на результирующей сейсмограмме волну, отраженную от кровли слоя (Δv = = 0,3 км/с), невозможно выделить (на R = 170÷200 км $P^M_{отр}$ едва заметна). Вероятно, выделение ее по экспериментальным данным весьма затруднительно, так как фон помех на Кольском участке профиля довольно значительный.

Поскольку система выделенных отраженных продольных волн не является полной, то лучевое трассирование позволяет определить участки отражающих границ, для которых время регистрации на интервале прослеживания вдоль профиля совпадает с расчетами. На обобщенной модели они маркированы утолщенными линиями (рис.8).

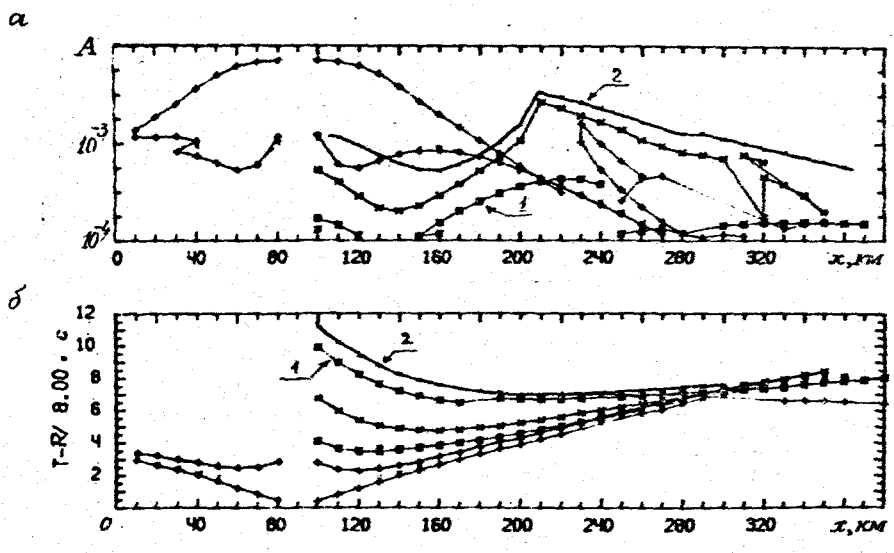


Рис.7. Амплитудные кривые (а) и годографы (б) первых и последующих волн, трассируемых лучами в модели (см. рис.6, в) для ПВ 9
1 и 2 – годографы волн, отраженных соответственно от кровли и подошвы слоя пониженной скорости в переходной зоне кора – мантия

Интересно отметить, что годограф первых волн из ПВ 9 практически совпадает, как с годографом из ПВ 2 (1983 г.), так и с годографом из ПВ I на профиле Печенга – Костомукша (1981 г.). Более того, выделенные в последующих вступлениях внутрикоровые отражения практически тоже идентичны. Регистрация из ПВ 9 мантийной первой волны позволяет оценить граничную скорость под зоной перехода кора – мантия и рекомендовать этот годограф как типовой для Кольского блока, довольно однородного по распределению упругих параметров.

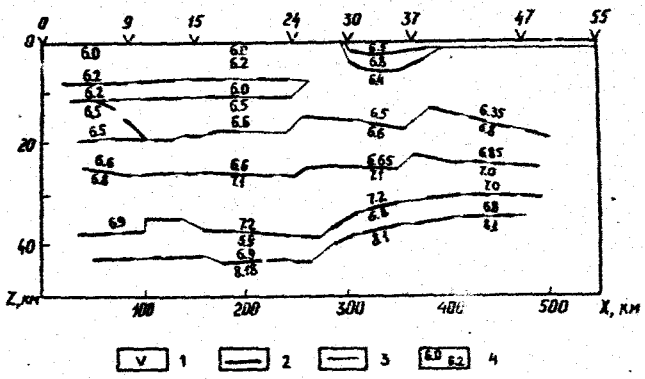


Рис.8. Сейсмическая модель земной коры вдоль профиля Печенга – Умбозеро – Ручьи
1 – пункты возбуждения колебаний (ПВ); 2 – отражающие границы, для которых получено совпадение теоретических и экспериментальных годографов; 3 – модельные сейсмические границы; 4 – значения скорости продольных сейсмических волн, км/с

Весьма существенные возмущения появляются на годографах волн, распространяющихся в пределах аномальной высокоскоростной зоны между ПВ 30 и ПВ 37. Совпадение встречных годографов первых волн, их высокие кажущиеся скорости (до 6,8 км/с) и значительная интенсивность по-

воляют оценить размеры зоны и значения скоростей в ней (рис.8). На расстояниях, больших чем 100 км от источника, для ПВ 30 и ПВ 37 наблюдаются лишь очень слабые, неуверенно выделяемые вступления, напоминающие дифрагированные волны, выходящие в зоне тени. Это естественно, так как контраст скорости в подстилающей толще и в аномальной зоне составляет примерно 0,4 км/с. Значительная глубина (5–7 км) высокоскоростной зоны вызывает существенное изменение траектории лучей, выходящих в ней на поверхность, что приводит к большим кажущимся скоростям даже на нагоняющих годографах. На геологической карте этой зоне соответствует область развития Имандра-Варзугского грабена. Более детальные сейсмические работы на этом объекте представляют несомненный интерес.

В целом мощность коры для западной части профиля до расстояний 240 км хорошо согласуется с оценками С.А.Анкудинова и И.В.Литвиненко [3], полученным на профилях I и II (см. рис.I). Внутрикоровые границы освещаются продольными отраженными волнами на интервалах 40–50 км. Совместное рассмотрение кинематики продольных и поперечных волн позволяет определить отношение v_p / v_s, которое изменяется как с глубиной, так и по латерали, варьируя от I,65 до I,90. В переходное зоне, верхняя граница которой трассируется весьма неуверенно, это отношение имеет наибольший горизонтальный градиент и достигает значения I,90. В восточной части профиля мощность коры уменьшается примерно до 35 км и внутрикоровые границы менее контрастны по скоростям. Выделенные высокоскоростные приповерхностные аномалии экранируют проникновение объемных волн на большие глубины, существенно меняя динамику регистрируемых волн. Поэтому для более детальной реконструкции элементов коры необходим дополнительный анализ всех сейсмических данных, накопленных в этом регионе.

Таким образом, данные о волнах разного типа, зарегистрированных на профиле, пересекающем весь Кольский полуостров в широтном направлении, существенно расширили набор оценок упругих характеристик среды и позволили реконструировать структурную модель коры. Что касается строения верхов мантии, то на основании непротяженных ветвей первых мантийных волн, зарегистрированных только из ПВ 9 и ПВ 30, получены только оценки граничной скорости (8,I–8,2 км/с). Использование методов нелинейной фильтрации позволило увеличить интервалы прослеживания глубинных отраженных волн, но верхний контур и скорости в переходной зоне требуют дополнительного уточнения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кац С.А., Шубник Б.М. Адаптивные многоканальные фильтры в сейсмических исследованиях. М.: Наука, 1986. 221 с.

2. Литвиненко И.В. Сейсмические исследования земной коры Балтийского щита // Геофизика: Труды / 27-й геол. конгресс. М., 1984. С. 9–20.

3. Литосфера Центральной и Восточной Европы. Геотраверсы I, II, У / В.Б.Соллогуб, А.В.Чекунов, И.В.Литвиненко и др. Киев: Наукова думка, 1988. 168 с.

4. О возможности использования нелинейной фильтрации в ГСЗ / А.В.Егоркин, Т.Н.Ерцова, С.К.Зюганов, Н.Г.Михайлов // Геолого-геофизические исследования дна океана: Сб. статей. М.: Наука, 1985. Вып.8. С.48–57.

5. Структура коры Кольского полуострова вдоль регионального профиля МОВЗ – ГСЗ Печенга – Умбозеро – Ручьи / Н.Е.Галдин, А.В.Егоркин, С.К.Жиганов и др. // Геотектоника. 1988. № 4. С.30–40.

6. Cerveny V., Psenchik I. SEIS83 - numerical modelling of seismic wave fields in 2-D laterally varying layered structure by the ray method // Documentation of earthquake algorithms. Edited by E.R.Engdahl. 1983. P. 36-40.

7. Crust and upper mantle structure along DSS Baltic profile in SE Finland / Luosto U., Korhonen H., Tiira T. et al. // Geophysical Journal International. 1990. V. 101. P. 89-110.

8. Grad M., Luosto U. Seismic models of the crust of the Baltic Shield along the SVEKA profile in Finland // Annales Geophysicae. 1987. V. 5, N. 6. P. 639-649.

9. Guggisberg B. Ch. Eine zweidimensionale refraktionsseismische interpretation der geschwindigkeites - tiefen - struktur des oberen Erdmantels unter der Fennoskandischen schild (Projekt Fennolora) // Dissertation ETH N 7945. Zurich, 1986. 199 s.

10. Luosto U., Korhonen H. Crustal structure of the Baltic shield based on Fennolora refraction data // Tectonophysics. 1986. V. 128. P. 183-208.