

## СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПРИБАЛТИКИ ПО ДАННЫМ ГЛУБИННОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Сергей АНКУДИНОВ<sup>а</sup>, Александр САДОВ<sup>а</sup>, Ханна БРИО<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Северо-Западное производственное геологическое объединение «Севзапгеология». Россия, 199 151 Санкт-Петербург, ул. Одоевского 24

<sup>б</sup> «Latvijas Ģeoloģija» («Латвийская геология»), K. Ulmanas ielā 36, LV1004 Rīga, Latvija (Латвия)

Представил В. Пуура

Поступила в редакцию 27/XII 1993, принята к печати 25/III 1994

**Аннотация.** Разрез земной коры на профиле глубинного сейсмического зондирования Советск—Кохтла-Ярве протяженностью около 600 км разделен на три слоя: гранитно-метаморфический (скорости упругих волн в слое 5,7—6,2 км/с), гранулитобазитовый (6,4—6,8 км/с) и нижний — переходный (7,0—7,2 км/с). Граничная скорость волн от поверхности Мохоровичича составляет около 8,0 км/с. Выявлена огромная впадина земной коры с резко увеличенной мощностью переходного слоя (от 6—8 км на краях до 24 км в центре), осложненная глубинными разломами. Южная и северная части профиля, составляя отдельные блоки, имеют минимальную в разрезе мощность земной коры — 40 и 46 км. В центральной части профиля мощность коры достигает 63 км.

**Ключевые слова:** строение земной коры, глубинное сейсмическое зондирование, Русская плита, страны Балтии.

В 1983—1986 гг. Северо-Западное производственное геологическое объединение «Севзапгеология» и Управление геологии Латвийской ССР (при участии Ленинградского горного института им. Г. В. Плеханова) выполнили сейсморазведочные работы методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) вдоль регионального профиля протяженностью около 600 км, пересекающего территорию стран Балтии — Литву, Латвию и Эстонию.

Региональный профиль ГСЗ Советск—Кохтла-Ярве (рис. 1) является частью одного из опорных геотраверсов I класса на территории бывшего СССР. С севера на юг геотраверс пересекает крупные геотектонические элементы западной части Восточно-Европейской платформы — восток Балтийского щита, южный склон Балтийского щита и запад Русской плиты (Балтийскую синеклизу).

Основной целью сейсмических исследований вдоль регионального профиля Советск—Кохтла-Ярве было изучение глубинного геологического строения земной коры южного склона Балтийского щита и Балтийской синеклизы. Ранее в пределах этих тектонических элементов глубинные исследования методом ГСЗ не проводились. Представления

о глубинной структуре земной коры основывались на интерпретации результатов аэромагнитных и гравиметрических съемок, а также на данных исследований методом ГСЗ в сопредельных районах. На основе интерпретации геофизических полей на территории запада Русской плиты выделены блоки земной коры различного порядка, мощность земной коры в целом оценена в 40—44 км (Тектоническая карта, 1980). Ближайшими профилями ГСЗ к профилю Советск—Кохтла-Ярве были профиль Багратионовск—Советск на территории Калининградской области РФ и профиль Лахденпохья—Сегозеро в южной части Карелии (эти оба профиля являются частями указанного геотраверса). По данным ГСЗ, на профиле Багратионовск—Советск мощность

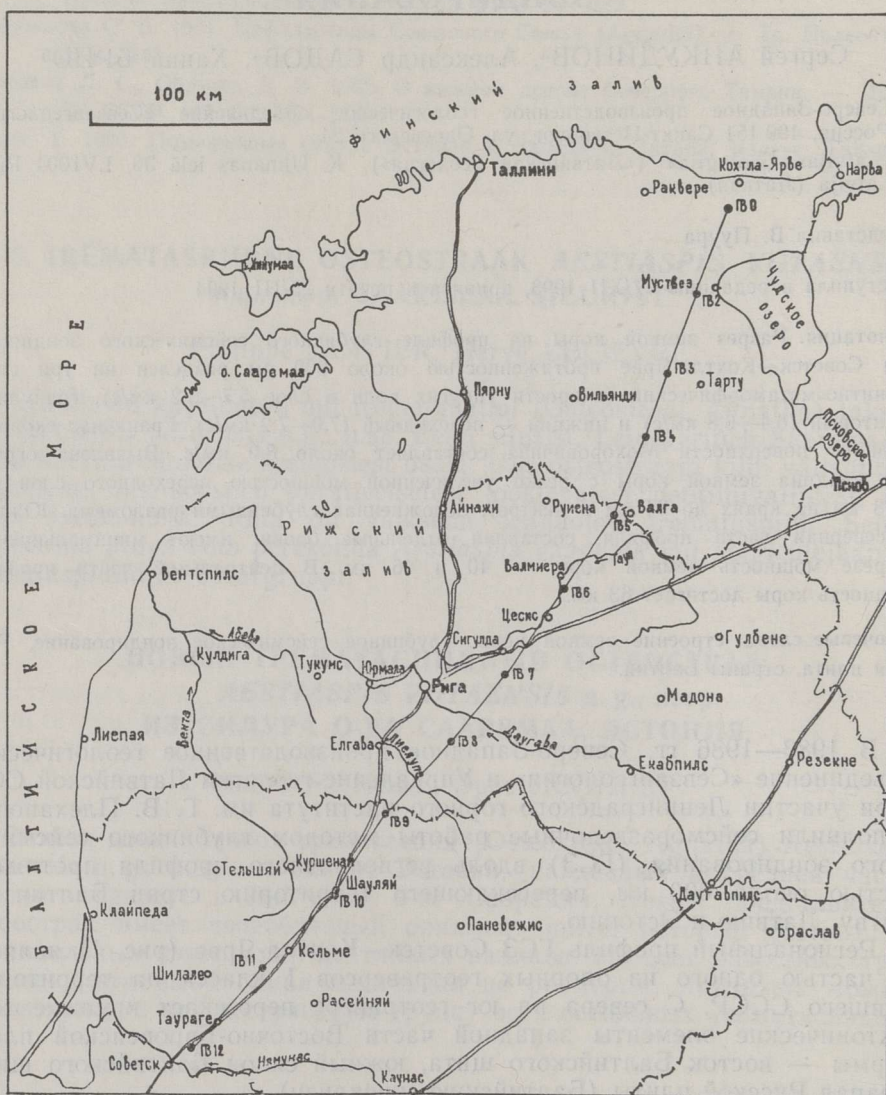


Рис. 1. Схема расположения профиля глубинного сейсмического зондирования Советск—Кохтла-Ярве. ГВ0—ГВ12 — пункты взрыва.

Fig. 1. Location of the Sovetsk—Kohtla-Järve profile. ГВ0—ГВ12 designate the shot-points.

земной коры составляет 42 км, внутрикоровый разрез дифференцируется на четыре слоя — осадочный, гранитный, базальтовый и переходный. В Южной Карелии профиль ГСЗ Лахденпохья—Сегозеро пересекает одну из крупных структур южной части Балтийского щита — Ладожский мегаблок, в пределах которого мощность земной коры (45—46 км) несколько увеличена по отношению к «нормальной» мощности земной коры Балтийского щита (40—42 км).

Методика полевых наблюдений при исследованиях ГСЗ на профиле Советск—Кохтла-Ярве в принципе была аналогична методике работ на других участках геотраверса. Выполнялось дискретное профилирование на линейных зондированиях по взаимноувязанной системе годографов при возбуждении упругих колебаний специальными и, частично, промышленными взрывами. Система наблюдений на профиле была рассчитана на регистрацию упругих волн от границ раздела в земной коре и волн от подошвы земной коры (поверхности Мохоровичича, или поверхности М). Специальная регистрация преломленных волн от поверхности кристаллического фундамента не предусматривалась, что объясняется хорошей степенью изученности фундамента сейсморазведкой методом отраженных волн и корреляционным методом преломленных волн, а также буровыми работами. Взрывы регистрировались одновременно большим числом сейсморазведочных станций (в основном регистраторами «Тайга-2», число которых доходило до 24). Двумя спаренными регистраторами обрабатывалось одно линейное зондирование длиной 2200 м (с шагом между группами сейсмоприемников 200 м). Коэффициент заполнения профиля линейными зондированиями составлял 0,70 (отношение общей длины линейных зондирований к общей длине профиля).

В целом система встречных и нагоняющих годографов, отработанная на профиле, обеспечила корреляционную увязку основных групп глубинных волн (включая волны от поверхности М). В результате анализа волнового поля, зарегистрированного на профиле, было выделено несколько достаточно устойчивых групп волн вдоль всего маршрута. Ниже дается их краткая характеристика.

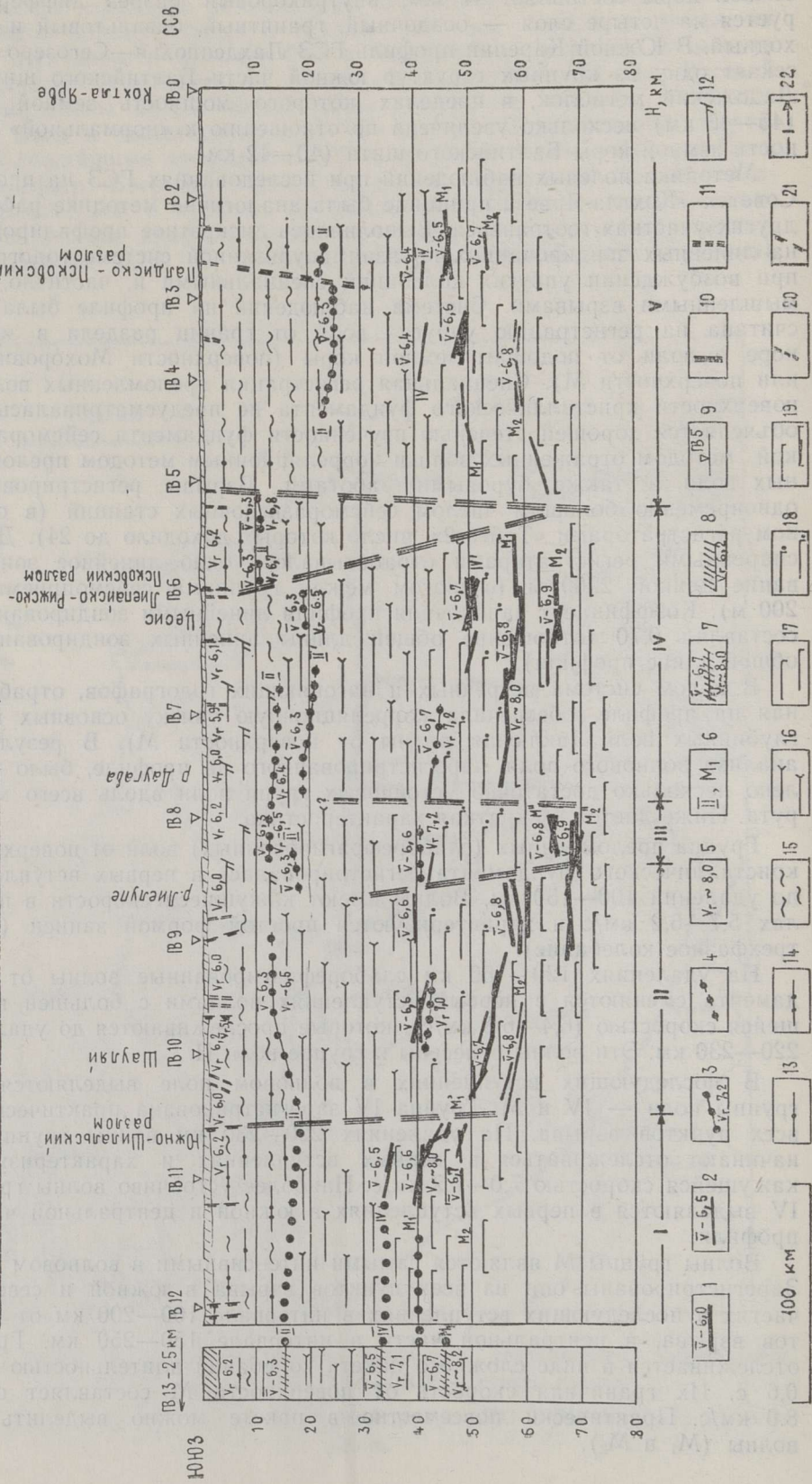
Группа преломленных (слаборефрагированных) волн от поверхности кристаллического фундамента регистрировалась в первых вступлениях до удалений 100—150 км. Волны имеют кажущиеся скорости в пределах 5,7—6,2 км/с и характеризуются простой формой записи (двух-трехфазное колебание).

На удалениях 120—150 км слаборефрагированные волны от фундамента сменяются в первых вступлениях волнами с большей кажущейся скоростью (6,4—6,8 км/с), которые прослеживаются до удалений 220—230 км. Эти волны отнесены к группе волн II.

В последующих вступлениях в волновом поле выделяются две группы волн — IV и M. Группа IV зарегистрирована практически из всех пунктов взрыва. На удалениях 220—230 км волны группы IV начинают отслеживаться в первых вступлениях и характеризуются кажущейся скоростью 7,0—7,2 км/с. Наиболее устойчиво волны группы IV выделяются в первых вступлениях в южной и центральной частях профиля.

Волны группы M являются самыми интенсивными в волновом поле. Зарегистрированы они из всех пунктов взрыва в южной и северной частях в последующих вступлениях в интервале 100—200 км от пунктов взрыва, в центральной части в интервале 150—250 км. Группа отслеживается в виде сложного пакета колебаний длительностью 0,2—0,6 с. Их граничная скорость от поверхности M составляет около 8,0 км/с. Практически повсеместно в пакете можно выделить две волны ( $M_1$  и  $M_2$ ).

Балтийская синеклиза — Латвийская седловина — Южный склон Балтийского щита



При построении сейсмического разреза вдоль профиля зарегистрированные в последующих вступлениях волны рассматривались как отраженные от глубинных границ раздела, первые волны отнесены к преломленным (слаборефрагированным). Эффективные скорости для построения сейсмических границ определены способом подбора по взаимноувязанным годографам. Построение сейсмических границ выполнено стандартными приемами. Следует отметить, что границы, построенные по разным типам волн, хорошо совпадали на разрезе.

Глубинный разрез земной коры по профилю Советск—Кохтла-Ярве, составленный на основе сейсмического разреза ГСЗ (рис. 2), в целом характеризуется большим диапазоном изменения мощности земной коры, сложным рельефом сейсмической границы, сопоставляемой с подошвой земной коры (границы М), сложным поведением глубинных внутрикоровых границ в различных частях разреза. В разрезе земной коры выделяются два внутрикоровых горизонта — II и IV, а сам разрез разделен (с определенной степенью условности) на три слоя — гранитно-метаморфический, гранулит-базитовый и нижний — переходный, который снизу ограничен подошвой земной коры. Соответственно, горизонт II рассматривается как верхняя граница гранулит-базитового слоя (скорости упругих волн в слое 6,4—6,8 км/с), горизонт IV — как верхняя граница переходного слоя (скорости упругих волн 7,0—7,2 км/с).

Рис. 2. Глубинный разрез земной коры по профилю Советск—Кохтла-Ярве (отношение вертикального масштаба к горизонтальному 2,5 : 1).

Сейсмические границы, построенные по отраженным волнам: 1 — интенсивным, протяженным, взаимноувязанным с указанием средних скоростей  $\bar{v}$ , км/с, 2 — одиночным; по преломленным волнам: 3 — встречным взаимноувязанным годографам с определением граничной скорости  $v_r$ , км/с, 4 — одиночным годографам; 5 — предполагаемое значение  $v_r$ , км/с; 6 — индексы сейсмических границ; 7 — положение основных глубинных границ по результатам работ на профиле Советск—Торунь (по неопубликованным данным И. В. Литвиненко); 8 — поверхность кристаллического фундамента; 9 — пункты взрыва. Зоны разломов по данным глубинного сейсмического зондирования: 10 — проникающие в верхнюю мантию, 11 — внутрикоровые. Метаморфические породы (Геологическая карта, 1980): 12 — биотит-амфиболовые и биотитовые плагиогнейсы и кристаллические сланцы; 13, 14 — породы гранулитовой фации метаморфизма, 13 — преимущественно биотит-, амфибол- и пироксеносодержащие гнейсы и кристаллические сланцы, 14 — глиноземистые гнейсы; 15 — интрузивные и ультраметаморфические породы. Ассоциации пород разреза земной коры: 16 — диориты, габбро-диориты, габбро-амфиболиты, амфиболиты, 17 — основные гранулиты, метагаббро, 18 — гранат-пироксеновые породы, 19 — ультраосновные породы. Разрывные нарушения: 20 — непроникающие в осадочный чехол, 21 — проникающие в осадочный чехол. Блоки: 22.

Fig. 2. Interpretive crustal section along the Sovetsk—Kohvila-Järve profile (vertical magnification is 2.5:1).

1, 2 — reflection discontinuities,  $\bar{v}$  — average velocity of upper media, km/s; 3, 4 — refraction discontinuities,  $v_r$  — velocity immediately below the discontinuity, km/s; 5 — approximate velocity immediately below the Moho discontinuity; 6 — indexes of discontinuities, M — Moho discontinuity; 7 — discontinuities on the profile Sovetsk—Torun (courtesy of I. V. Litvinenko); 8 — top of the basement; 9 — shot-point; 10, 11 — deep faults; 12 — biotite-amphibole and biotite plagiogneisses and schists; 13, 14 — metamorphic rocks of granulite facies: 13 — mainly biotite-, amphibole-, and pyroxene-bearing gneisses and schists; 14 — aluminiferous gneisses; 15 — intrusive and ultrametamorphic rocks; 16 — diorite, gabbro-diorite, gabbro-amphibolite, and amphibolite; 17 — basic granulite and metagabbro; 18 — garnet and pyroxene rocks; 19 — ultrabasic rocks; 20 — fault in the basement; 21 — fault in the basement and sedimentary cover; 22 — crustal blocks.

По мощности земной коры глубинный разрез профиля ГСЗ достаточно четко разделяется на три части — южную, центральную и северную. Южная часть, протяженностью около 50 км, характеризуется мощностью земной коры около 40 км при спокойном горизонтальном залегании границы М. В силу особенностей систем наблюдений ГСЗ информация о глубинном разрезе внутри земной коры в южной части профиля является неполной. Однако в нижней части разреза выделен переходный слой мощностью около 6 км. В общем плане южная часть профиля отнесена нами к Неманскому блоку, разрез которого полнее изучен методом ГСЗ на профиле Багратионовск—Советск.

В принципе же данные ГСЗ на обоих профилях хорошо сопоставимы. Центральная часть профиля (протяженностью около 250 км) выделяется прежде всего как аналогичная область резкого увеличения мощности земной коры, которую можно рассматривать как крупную глубинную структуру, в тектоническом плане охватывающую центральную и северную части Балтийской синеклизы. Максимальная мощность земной коры в центре структуры составляет более 60 км, при этом увеличение ее мощности происходит в основном за счет увеличения мощности переходного слоя. Непростым является здесь и рельеф подошвы земной коры, что, очевидно, связано со сложной блокировкой глубинного разреза и наличием крупных зон тектонических нарушений. В центральной части профиля выделены три самостоятельных блока — Куршский, Курземский и Рижский, разделенных глубинными зонами разломов.

Куршский блок является переходным от нормального разреза земной коры Неманского блока к внутрикоровому разрезу аномально увеличенной мощности. От Неманского блока он отделяется глубинным Южно-Шилальским разломом и характеризуется мощностью земной коры от 50 до 60 км (с увеличением к центру профиля), мощностью переходного слоя от 10 до 17 км.

Центром крупной глубинной структуры, выделенной на профиле, очевидно, является Курземский блок. В его пределах мощность земной коры достигает 63 км, а мощность переходного слоя — 24 км. К северу от Курземского выделен Рижский блок с мощностью земной коры около 60 км при мощности переходного слоя 8—12 км. Блок расположен в северной части Балтийской синеклизы и на севере граничит со структурами южного склона Балтийского щита. В зоне сочленения выделяется крупная область глубинных тектонических нарушений, в которую, очевидно, входят Лиепайско-Рижско-Псковская и Слокско-Цесисская зоны разломов.

Северная часть глубинного разреза профиля, пересекающая область южного склона Балтийского щита, характеризуется мощностью земной коры 46—51 км и мощностью переходного слоя 6—8 км.

Таким образом, вдоль всего профиля достаточно четко установлено блоковое строение разреза земной коры. Все выделенные блоки различаются не только мощностью земной коры, но и положением внутрикоровых границ, а также мощностью слоев. Принципиальным является то обстоятельство, что исследованиями ГСЗ на западе Восточно-Европейской платформы выявлена крупная глубинная структура земной коры с резко увеличенной мощностью переходного слоя. Разрезы земной коры рассмотренного типа выявлены и изучены в последние годы в других районах Восточно-Европейской платформы, где проведены глубинные сейсмические исследования. Подобная зона четко установлена в пределах северо-западного Беломорья в восточной части Балтийского щита; близким типом разреза характеризуется глубинный разрез свекофеннид Финляндии, разрез Ладожского мегаблока Карело-Финского региона. Сопоставление и анализ геолого-геофизических

особенностей, характерных для областей с существенно увеличенной мощностью земной коры, позволяют рассматривать эти области в качестве мобильных на протяжении длительного времени развития земной коры. Можно говорить и об их современной активности, на что указывают данные о землетрясениях на территории Балтийского щита и его обрамления. Длительная активность этих областей предопределила на Балтийском щите их металлогеническую специализацию.

Крупная глубинная структура, выявленная на территории Прибалтики в результате исследований ГСЗ, дает возможность с новых позиций рассматривать перспективы обнаружения месторождений полезных ископаемых как в образованиях кристаллического фундамента, так и в породах осадочного чехла.

## ЛИТЕРАТУРА

- Геологическая карта кристаллического фундамента республик Советской Прибалтики. 1980. Масштаб 1 : 500 000. Гл. ред. А. А. Григялис. Ленинград.
- Тектоническая карта республик Советской Прибалтики. 1980. Масштаб 1 : 500 000. Гл. ред. А. А. Григялис. Ленинград.

## BALTIMAADE MAAKOORE EHITUS SEISMILISE SÜVASONDEERIMISE PÕHJAL

Sergei ANKUDINOV, Aleksander SADOV, Hanna BRIO

Välitööd 600 km pikkusel seismilise süvasondeerimise profiilil Sovetsk—Kohtla-Järve toimusid aastail 1983—1986. Registreeriti nii peegeldunud kui ka murdunud seismilisi laineid. Saadud andmete põhjal koostati maa-koore läbilõige.

Mitmekihilises maa-koores murdunud lained jagunevad kolme kiirus-gruppi: 1) 5,7—6,2 km/s aluskorra pinnal; 2) 6,4—6,8 km/s graniit- ja basaltkihi kontaktialal; 3) 7,0—7,2 km/s basalt- ja üleminekukihi kontaktialal. Maa-koore alumisel piiril (Moho piirpind) murdunud lainete kiirus on ligikaudu 8,0 km/s.

Geoloogilisel läbilõikel on selgelt nähtav hiidvaond, mille keskosas maa-koore paksus on kasvanud peamiselt üleminekukihi paksenemise tõttu. Läbilõige on jaotatud süvamurrangutega plokkideks, millele on iseloomulikud maa-koore ja üleminekukihi järgmised paksused: I  $\approx$  40 ja  $\approx$  6 km, II 50—60 ja 10—17 km, III  $\approx$  63 ja  $\approx$  24 km, IV  $\approx$  60 ja 8—12 km ning V 46—51 ja 6—8 km.

## CRUSTAL STRUCTURE OF BALTIC COUNTRIES ON THE BASIS OF DEEP SEISMIC SOUNDING DATA

Sergei ANKUDINOV, Aleksandr SADOV, and Hanna BRIO

The deep seismic sounding (DSS) profile Sovetsk—Kohtla-Järve (Fig. 1) runs through the Baltic countries Lithuania, Latvia, and Estonia, and is some 600 km long. Field measurements on this profile were carried out in 1983—86. The Northwest State Geological Enterprise (SEVZAP-GEOLOGIA), Russia, and the Board of Geology of Latvia in cooperation with the Leningrad Institute of Mines participated in the field work. The main aim of these investigations was to determine the structure of the

Earth's crust on the profile crossing different tectonic units of the Russian Platform: the Baltic Syncline and the southern slope of the Baltic Shield.

Refracted and reflected waves from discontinuities in the Earth's crust were recorded. Refracted waves with velocities of 5.7—6.2 km/s are the first arrivals between the shot-point and a distance of some 100—150 km. Within the distance interval 150—230 km, the first arrivals are refracted waves with velocities of 6.4—6.8 km/s. Beginning from a distance of some 230 km, the first arrivals are refracted waves with velocities of 7.0—7.2 km/s. Refracted waves connected with Moho discontinuity are characterized by a relatively low velocity of about 8.0 km/s. The mean velocity for the whole crust is very high, some 6.6—6.8 km/s.

The cross-section of the Earth's crust on the profile (Fig. 2) was established from the interpretation of both refracted and reflected waves. The total thickness of the crust is 40—63 km. In general, the structure of the crust has a clear multilayered block-type character. The crust is composed of three layers ("granitic-metamorphic", "granulitic-basic", and "transitional") extending along the profile and separated by main curved discontinuities (II and IV in Fig. 2). Five crustal blocks have been distinguished along the profile. There are big differences between the SW, central, and NE segments of the profile. In the SW segment (block I) the thickness of the crust and the transitional layer is about 40 and 6 km, respectively. On the background of the almost horizontal Moho boundary, the sharp increase in its depth in the central part of the profile would account mainly for the volume expansion of the transitional layer. This about 250 km long segment corresponds to the central and northern parts of the Baltic Syncline, a structure well known in local geotectonics, and consists of three blocks. In block II the thickness of the crust and the transitional layer is 50—60 and 10—17 km, respectively. The greatest values of the thickness of the crust (63 km) and the transitional layer (24 km) are reached in block III. In block IV the crustal thickness is some 60 km and the thickness of the transitional layer is 8—12 km. The NE segment (block V) corresponds to the southern slope of the Baltic Shield with a crust 46—51 km thick. The thickness of the transitional layer is 6—8 km. So there is a considerable depression of the Earth's crust in the Baltic countries and the crust is broken into blocks by deep-seated faults.