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

УДК 551.311+551.14

А.В.ЧЕКУНОВ, Л.Т.КАЛЮЖНАЯ, А.А.ТРИПОЛЬСКИЙ,
О.М.ХАРИТОНОВ, Н.В.ШАРОВ, М.А.БОРОДУЛИН,
А.ГУТЕРХ, Р.МАТЕЖОК, Э.ПЕРХУЦЬ, М.ГРАД

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ БАЛТИЙСКОГО И УКРАИНСКОГО ЩИТОВ ПО ДАННЫМ ГСЗ

Древние докембрийские щиты являются крупнейшими геоструктурными элементами нашей планеты, в недрах которых широко развиты многочисленные месторождения полезных ископаемых. В пределах щитов кристаллические породы докембрия обнажаются на дневной поверхности и поэтому наиболее доступны для различного рода геолого-геофизических исследований.

На протяжении многих лет эти древнейшие структуры изучались методами магнитометрии и гравиметрии, которые решали такие геологические вопрос, как поиски и разведка месторождений железных руд, картирование разломов и др. Однако перечисленные методы давали недостаточные сведения о глубинном строении щитов. Применение сейсморазведки для решения вопросов глубинной структуры докембрия позволило получить более информативные материалы.

С высоты современных достижений в исследовании глубинного строения консолидированной земной коры мы должны вспомнить добрым словом ученых - пионеров такого рода работ, чьими усилиями разрабатывалась и совершенствовалась методика сейсмических исследований.

Вопрос о возможности использования отраженных волн для изучения глубинного строения земной коры был рассмотрен Г.А.Гамбурцевым еще в 1939 г. [2]. В результате экспериментальных сейсмических исследований, проведенных в районе Серпухова и Коврова, были зарегистрированы четко выраженные оси синфазности, подтверждена возможность получения записей на больших временах, обеспечивающая глубинность исследований земной коры до глубин около 40 км. Однако при этом выявились большие трудности выделения на сейсмограммах однократных глубинных отражений среди множества кратных отраженных волн. Это обстоятельство явилось причиной того, что развитие получили методы, основанные на регистрации преимущественно преломленных волн.

В начале 50-х гг. коллективом Ин-та физики Земли АН СССР под руководством Г.А.Гамбурцева был разработан метод глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) [2].

Следует отметить, что примерно в то же время многие исследователи за рубежом уделяют большое внимание вопросу регистрации глубинных отражений в докритической области и использованию их для изучения глубинного

строения земной коры [33, 34, 37, 38]. Так, в железорудном района Зигерланд в северо-восточной части Рейнских гор (ФРГ) были успешно проведены сейсмические работы МОВ, в результате которых получены сведения о глубинном строении района месторождения до глубины 25 км. Установлено, что железорудные залежи, известные по шахтным выработкам, залегают почти вертикально над теми участками, где появляются значительные нарушения в поведении глубоких отражающих границ, которые могут интерпретироваться как зоны разломов [37].

Первые работы ГСЗ с целью изучения структур глубокого докембрия в пределах Украинского и Балтийского щитов были начаты практически одновременно исследователями Ин-та геофизики АН УССР (под руководством В.Б.Соллогуба) и Ленинградского горного института им. Г.В.Плеханова (под руководством И.В.Литвиненко) в 1958-1960 гг.

До этого времени в нашей стране уже имелся некоторый опыт работ ГСЗ, проводимых в районах с мощным осадочным чехлом и на море (Ю.Н.Годин, Е.И.Гальперин, П.С.Вейцман и др.). Однако применительно к условиям докембрийских щитов, характеризующихся развитием сильно дислоцированных и нарушенных структур с крутыми углами падения пород, сложной природой геологических контактов, слабой скоростной дифференциацией докембрийских образований и т.п., методические разработки применения ГСЗ отсутствовали.

В 1958-1960 гг. по инициативе И.В.Литвиненко были начаты работы методом ГСЗ на Балтийском щите. Первый профиль Кемь - Ухта на севере Карелии протяженностью 200 км был отработан с целью изучения древних структурно-фациальных зон щита. Полученные сведения о глубинной структуре Балтического щита оказались весьма интересными, а результаты работ вполне обнадеживающими [6, 20]. В последующие годы эти исследования были продолжены с большей детализацией и особое внимание при изучении характерных структур щита было уделено отраженным волнам [13, 14, 17]. В отдельных районах, например в пределах Печенгской никеленосной вулканогенной структуры, наряду с пологими отражающими горизонтами были выделены интенсивные отраженные волны от крутопадающих границ, связанных с контактами различных покровов пород печенгской серии [18, 19]. Это послужило основанием для разработки методики региональных работ МОВ с целью изучения геологического строения консолидированной коры до глубины 10-20 км [15]. Методика, разработанная группой ленинградских исследователей под руководством И.В.Литвиненко, в дальнейшем совершенствовалась.

Начиная с 1962 г., на территории Балтийского щита по профилям с различной протяженностью и плотностью наблюдений проводятся планомерные сейсмические исследования МОВ и ГСЗ [6, 8, 17]. Анализ полученных материалов позволил И.В.Литвиненко прийти к новым выводам в отношении структуры глубокого докембрия Балтийского щита, актуальность и научная значимость которых не утрачены до наших дней [1, 13, 14, 16-20].

Так, в результате работ ГСЗ была впервые доказана слоистость земной коры Балтийского щита по упругим параметрам. Наряду с волнисто-слоистым характером разреза, по нарушениям вблизи дневной поверхности и крутозале-

гающим отражающим площадкам в коре выделены зоны глубинных разломов, определяющие блоковое строение консолидированного фундамента щита. В разрезах земной коры прослежены сейсмические границы двух типов: пологие, почти субгоризонтальные, и наклонные под различными углами.

Границы первого типа, пологие и субгоризонтальные, повсеместно выделяются в материковой коре различных геологических регионов с помощью ГСЗ и методов сейсмологии. Эти границы связаны с определенными интервалами разреза, имеющими тонкую и сложную структуру с высокоскоростными, низкоскоростными и градиентными неоднородностями.

Границы второго типа, наклонные, часто крутопадающие, соответствующие контактам пород разного состава или зонам разрывных нарушений, доступны изучению преимущественно лишь МОВ. Справедливость вывода И.В.Литвиненко, касающегося границ второго типа, подтверждается и результатами региональных исследований МОВ-ОГТ по программам COCORP, DECORP, BIRPS, ECORS, ACORP, проведенным в последнее десятилетие в различных уголках земного шара [36, 39]. Этими исследованиями успешно продемонстрирована возможность выделения крутонаклоненных отражающих границ не только в земной коре, но и в верхней мантии (работы BIRPS) [41]. Как правило, эти границы отождествляют с различными тектоническими нарушениями, надвигами, зонами сдвиговых деформаций и т.д. [36, 39, 41].

Исследования глубинного строения докембрийских щитов сейсмическими методами, которые проводятся в настоящее время фактически на всех континентах, представляют собой в значительной мере продолжение и развитие идей и выводов, сформулированных в свое время И.В.Литвиненко.

На Украинском щите первые работы ГСЗ начаты в 1960 г. в Белозерском железорудном районе на южном склоне щита [7]. Основной задачей опытно-методических работ являлось изучение глубинных сейсмогеологических условий района и разработка методических приемов полевых и камеральных работ. В то время существовали сомнения в перспективности таких опытов, которые опирались на геологические данные о чрезвычайной сложности строения и преимущественно вертикальной слоистости докембрийских толщ. Тем не менее, вопреки всем сомнениям, были зарегистрированы регулярные волны, свидетельствующие о существовании в толще фундамента на сравнительно небольших глубинах (1,0-10,0 км) пологих сейсмических границ. Ранее подобные границы в консолидированной коре были известны на глубинах, обычно превышающих 10 км и достаточно больших, чтобы вызвать какие-либо особые трудности и противоречия при сопоставлении сейсмических разрезов и геологических данных о приповерхностных структурах.

Установление пологой расслоенности кристаллических комплексов на небольших глубинах сразу привело данные сейсмики и геологии в резкое противоречие. Остро встал вопрос о природе обнаруженных границ и их геологическом значении. С учетом большого принципиального значения полученных результатов сейсмические исследования в Белозерском районе были продолжены по более детальным системам наблюдений вдоль протяженных профилей, пересекающих Белозерское месторождение в различных направлениях [9].

В 1962-1963 гг. такого рода исследования проводились на ряде характерных объектов Украинского щита: в Криворожском бассейне, в пределах Коростенского плутона и Овручского синклинория [10, 24, 30].

В последующие годы на Украинском щите была отработана система профилей ГСЗ, освещающих глубинную структуру наиболее интересных в геологическом отношении районов.

Очень сложной структурой Украинского щита является расположенный в его северо-западной части район Коростенского плутона. В результате детальных сейсмических исследований КМПВ-ГСЗ изучено внутреннее строение плутона. В западной его части на глубине всего 1 км скорости достигают аномально больших значений (6,5-6,7 км/с), которые обычны для средней и нижней частей земной коры щитов. Вся верхняя кора до глубины 15 км характеризуется сложным многоярусным строением, обусловленным переслаиванием пород кислого и основного состава, значение скоростей в толще которых изменяется от 6,0 до 6,5 км/с. Глубже скоростная характеристика практически такая же, как и на других участках Украинского щита. Район плутона отличается относительно небольшой глубиной залегания подошвы земной коры - раздела М (36-38 км), который образует здесь очень пологий антиклинальный перегиб, осложненный крупными разломами. Между корой и верхней мантией обнаружен промежуточный слой со скоростью 7,7-7,9 км/с, также осложненный разломами, пространственно, а возможно и генетически, связанный с Коростенским плутоном. Наблюдаемые здесь глубинные разломы играли несомненно важную роль в процессе формирования структуры плутона, являясь подводящими каналами основной магмы [10, 24].

Докембрийские щиты - участки наиболее глубокого естественного среза земной коры - особенно благоприятны для изучения внутренней структуры наиболее древних малоизмененных слоев консолидированной коры, так как здесь отсутствует искажающее влияние осадочного чехла, что повышает возможности непосредственного исследования и сопоставления глубинных геологических и геофизических данных.

Расположенные в пределах Восточно-Европейской платформы Балтийский и Украинский щиты представляют собой выступы фундамента платформы в ее северо-западной и юго-западной окраинных частях. В последние годы щиты интенсивно изучаются сейсмикой ГСЗ-КМПВ и МОВ [7, 9, 10, 21, 24, 25, 27, 28, 30-32, 35, 40]. Результаты работ публикуются в многочисленных отечественных и зарубежных изданиях, однако глубинное строение Балтийского и Украинского щитов сравнивается крайне редко [29]. Выяснение генетических и других форм соотношений между крупными геологическими структурами на современном этапе познания глубинных недр Земли является одной из важнейших задач геологии. Изучение этих соотношений позволяет получить необходимые дополнительные сведения о глубинном строении и эволюции земной коры и использовать их для решения различных геологических проблем, а также при минералогических прогнозах. Метод сравнительного анализа стал возможен лишь в последнее время в связи с достигнутыми успехами при изучении глубинного строения земной коры и мантии геофизическими методами, способными проникать в недра Земли.

В статье авторы попытались провести краткий анализ и сопоставление различных особенностей строения литосферы Балтийского и Украинского щитов.

Украинский щит представляет собой сложную слоисто-блоковую структуру Восточно-Европейской платформы площадью около 250000 км^2, характеризующуюся общим юго-восточным простиранием. Контуры и простирание щита определяются разломами, отделяющими щит от прилегающих Львовской, Припятской, Днепровско-Донецкой и Причерноморской впадин.

Щит сложен кристаллическими породами архея и раннего протерозоя возрастом 3,8-1,7 млрд.лет. В его пределах широко развиты гранулитовая и амфиболитовая фации метаморфизма. В западной части щита обнажаются чарнокиты, которые представляют собой гранитизированные образования низов коры или даже верхов мантии. Глубинными разломами, основными из которых являются Тетеревский, Одесско-Тальновский, Криворожско-Кременчугский и Орехово-Павлоградский, он разделен на крупные блоки: Волынский, Подольский, Кировоградский, Приднепровский и Приазовский.

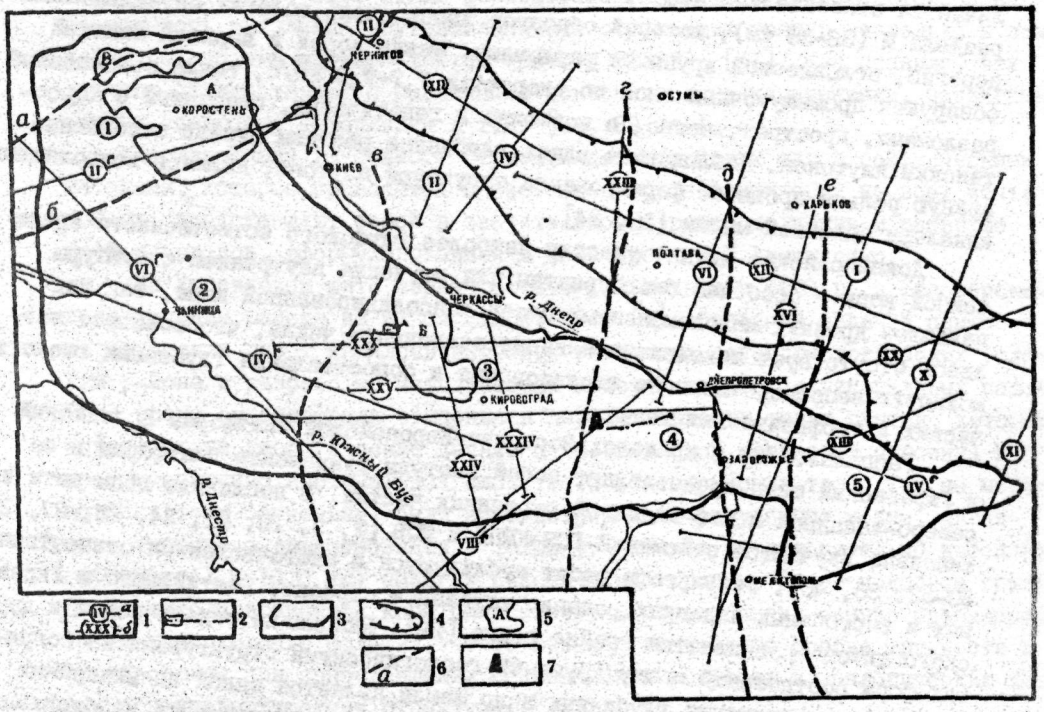


Рис.1. Система геотрансектов и профилей ГСЗ на Украинском щите
1 - региональные сейсмические профили (а - геотрансекты, б - профили ГСЗ); 2 - профиль МОВ в районе Криворожской СГС; 3-5 - контуры: Украинского щита (3), Днепровско-Донецкого палеорифта (4), Коростенского (5А) и Корсунь-Новомиргородского (5Б) плутонов, Овручского синклинория (5В); 6 - главные глубинные разломы: Сущано-Пержанский (а), Тетеревский (б), Одесско-Тальновский (в), Криворожско-Кременчугский (г), Кочкско-Белозерский (д), Орехово-Павлоградский (е); 7 - Криворожская сверхглубокая скважина (СГС); (1) - (5) - крупные блоки земной коры в пределах Украинского щита: Волынский (1), Подольский (2), Кировоградский (3), Приднепровский (4), Приазовский (5)

К настоящему времени на щите проведен большой объем сейсмических исследований, профили МОВ, ГСЗ, КМПВ пересекают все основные структуры щита, а в некоторых местах (Корсунь-Новомиргородский плутон, Новоукраинский массив) образуют площадные системы типа полигонов (рис.I). На отдельных сложных участках Украинского щита (Корсунь-Новомиргородский плутон, Криворожско-Кременчугская и Сурская структуры) проведены наблюдения МОГТ.

По данным ГСЗ установлено, что мощность земной коры Украинского щита равна в среднем 42-45 км и изменяется от 30-38 км под древними архейскими массивами и участками раннепротерозойской деструкции до 50-55 км под ныне денудированными орогенами того же возраста. Области утолщенной коры имеют субмеридиональное простирание и соответствуют Одесско-Ядловской, Криворожско-Крупецкой и Орехово-Павлоградской раннепротерозойским протогеосинклинальным зонам (рис.2).

Разделенные геосинклинальными зонами Подольский, Кировоградский и Приазовский протоплатформенные блоки характеризуются нормальной корой

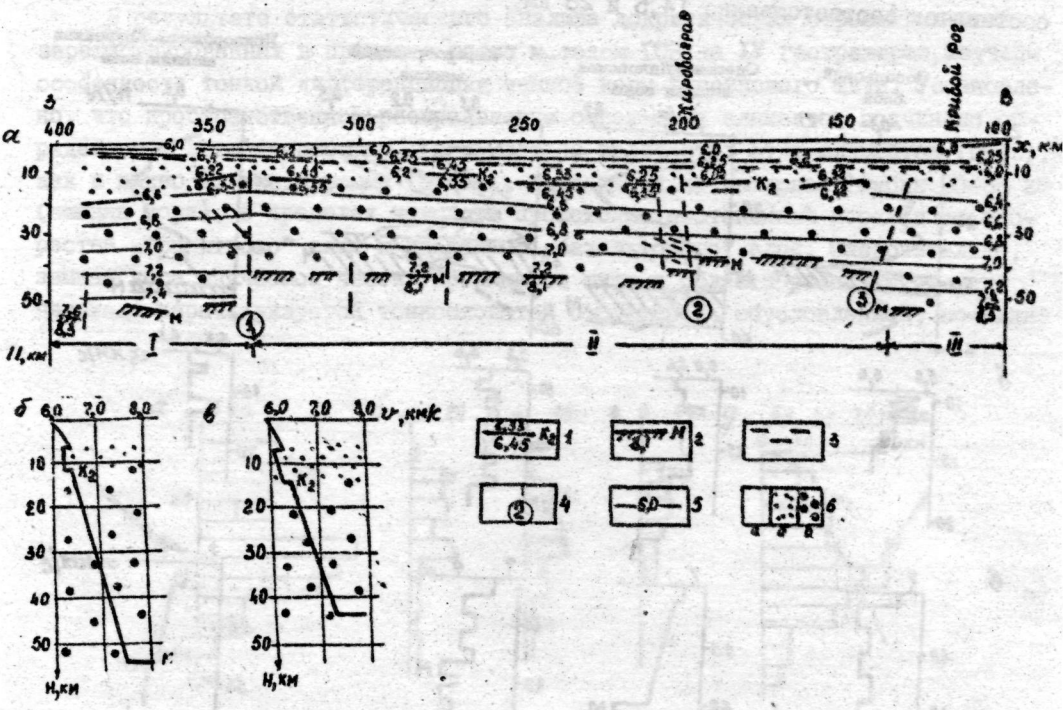


Рис.2. Сейсмический разрез земной коры по геотраверсу IУ на участке Днепропетровск - Голованевск (а) и сейсмические модели на ПК 350 и ПК 250 (б и в)

I - Одесско-Ядловская раннепротерозойская геосинклинальная зона, II - Кировоградский протоплатформенный блок, III - Криворожско-Кременчугская раннепротерозойская геосинклинальная зона; 1 - граница K_2 и значения скоростей выше и ниже границы в километрах в секунду; 2 - раздел M и значения граничной скорости в километрах в секунду; 3 - отражающие элементы в толще земной коры; 4 - глубинные разломы по данным ГСЗ: Тальновский (1), Кировоградский (2), Криворожско-Кременчугский (3); 5 - изолинии интервальных скоростей, км/с; 6 - скоростные этажи: верхний (а), средний (б) и нижний (в)

(34–42 км), аномально тонкую кору (28–30 км) имеет Запорожско-Сумской срединный массив.

На глубинах 8–20 км прослежен устойчивый отражающий горизонт K_2, над которым во многих местах располагается сейсмический волновод (рис.2). Глубины до горизонта K_2 закономерно уменьшаются с востока на запад, а в поле развития чарнокитов он исчезает.

Скорости сейсмических волн с глубиной плавно увеличиваются от 5,8–6,2 км/с у дневной поверхности до 7,0–7,3 км/с в низах коры. С учетом характера распределения скоростей земную кору щита можно разделить на три основных этажа: верхний (глубина до 5–7 км), средний (от 5–7 до 10–18 км) и нижний (от 10–13 до раздела М) [22, 26]. В пределах среднего этажа, подошвой которого является граница K_2, часто регистрируется слой с пониженной скоростью (волновод). Следует отметить, весьма интересное соотношение мощностей рассмотренных этажей: суммарная мощность верхнего и среднего этажей относятся к мощности нижнего, как 1:2. В абсолютных значениях это составляет соответственно 14,5 и 28 км.

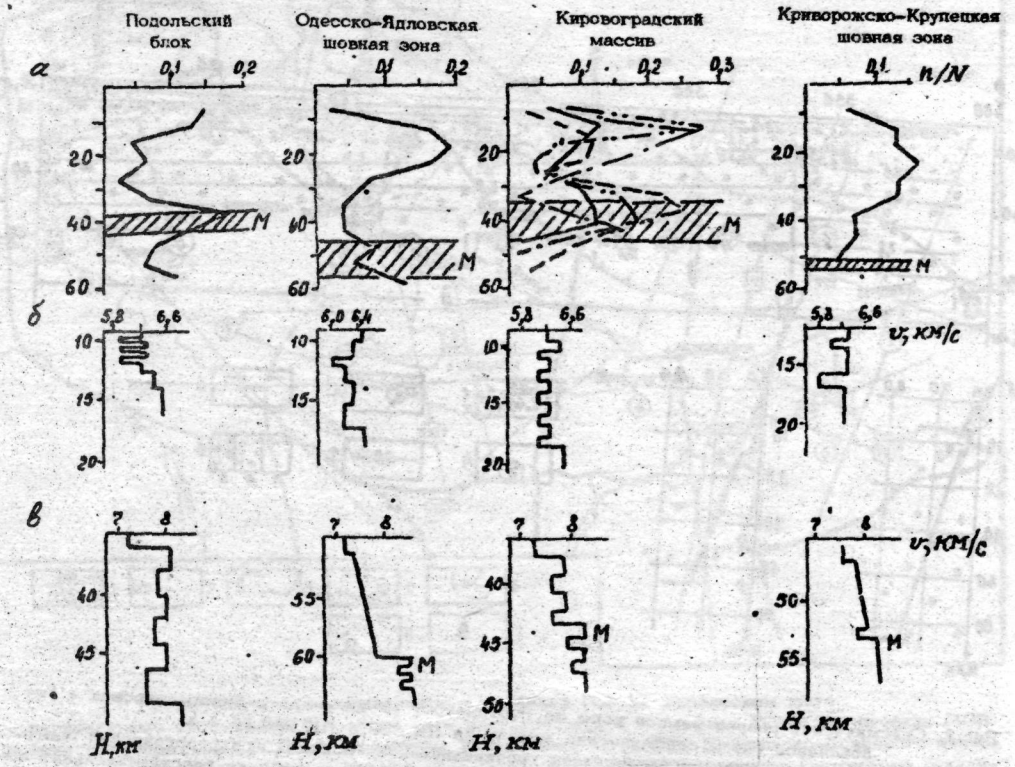


Рис.3. Характер расслоенности земной коры (а), акустические модели ее верхнего этажа (б) и зоны перехода кора – мантия (в) в центральной части Украинского щита (для Кировоградского блока совмещены данные нескольких профилей ГСЗ)

N и n – суммарная длина всех отражающих элементов соответственно в разрезе блока и для определенного интервала глубин; H – глубина; v – скорости распространения продольных сейсмических волн

Объяснение природы волновода и границы K_2 является в настоящее время дискуссионным. Возможны два варианта объяснений: геологический и тектонофизический. Согласно первой гипотезе, глубина залегания границы K_2 закономерно уменьшается с востока на запад, где она исчезает в поле развития чарнокитов Побужья. Это позволяет предполагать, что граница K_2 является реликтом первичного („лунного") субстрата планеты. Как следует из сейсмотектонического анализа, существование сейсмического волновода может быть связано с субгоризонтальной зоной повышенной трещиноватости пород (вторая гипотеза). Подошвой такой зоны, по-видимому, является граница K_2.

Земная кора Украинского щита расслоена весьма неравномерно. В целом по щиту сейсмическая расслоенность повышается в интервале глубин, соответствующих разделам K_2 и М, где наблюдаются сгущения локальных отражателей, что свидетельствует о сложной структуре этих разделов. Исключение составляют Криворожско-Крупецкая и Орехово-Павлоградская протогеосинклинальные зоны, в толще коры которых максимум расслоенности приходится на интервалы глубин 15-35 км, т.е. между границами K_2 и М (рис.3).

В результате статистического анализа докритических отраженных волн, зарегистрированных в процессе работ методом ГСЗ на IУ геотраверсе, изучены особенности тонкой дифференциации земной коры Украинского щита. Установлено, что пространственное распределение отражающих элементов подчинено определенным закономерностям. Максимальное количество этих элементов (пять), как и видно из гистограммы (рис.4), приходится на интервал глубин 30-35 км (нижняя кора), в пределах которого происходит постепенный переход от скоростей „гранитного" слоя к скоростям „базальтового" слоя. Следовательно, земная кора изучаемой части Украинского щита в области рассматриваемого перехода характеризуется тонкослоистой структурой, обусловленной, по-види-

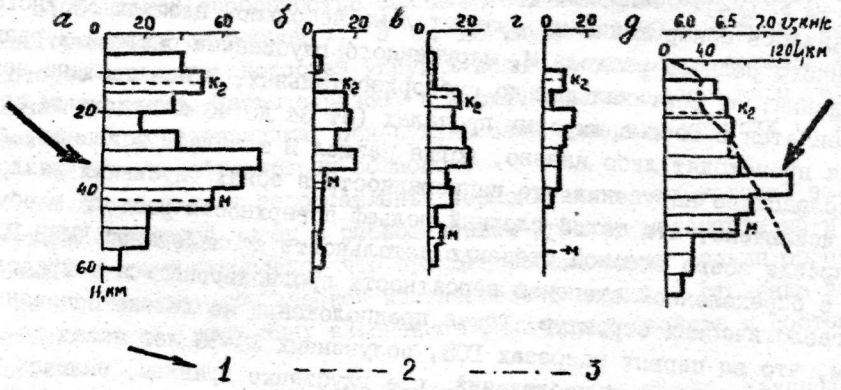


Рис.4. Гистограммы распределения по глубине докритических отражений для Украинского щита (по материалам IУ геотраверса): а - Кировоградский блок; б - Приазовский блок; в - Криворожско-Крупецкая и Орехово-Павлоградская геосинклинальные зоны; г - Одесско-Ядловская геосинклинальная зона; д - суммарная гистограмма

1 - области повышенной расслоенности; 2 - граница K_2 и раздел М; 3 - осредненная функция скорость - глубина

мому, сложными пространственными взаимоотношениями пород различного состава. Это соответствует результатам глубинных сейсмических работ методом отраженных волн по программам COCORP, ECORS, BIRPS, DECORP и др., согласно которым нижняя кора различных континентов земного шара имеет повышенную расслоенность [36, 39].

Представляют интерес результаты исследования тонкослоистой структуры переходной зоны кора – мантия. На основании спектрального анализа сейсмических материалов ГСЗ по IУ геотраверсу выявлены два типа моделей переходной зоны кора – мантия. Первый свойственен протоплатформенным блокам и характеризуется интенсивной дифференциацией низов коры, в меньшей степени – верхов мантии. Мощность отдельных слоев в переходной зоне изменяется от 0,5 до 3 км в коре и до I км в мантии. В пределах раннепротерозойских геосинклинальных зон (второй тип) низы коры характеризуются плавным нарастанием скорости с глубиной в толще мощностью 3–9 км, в верхней мантии наблюдается чередование тонких слоев с небольшой инверсией скорости. Расслоенность переходной зоны (низов коры) геосинклинальных зон проявляется гораздо слабее, чем в протоплатформенных блоках. В частности, повышенная расслоенность низов коры Кировоградского протоплатформенного блока может быть объяснена глубокими преобразованиями, которые произошли здесь под влиянием поднимавшегося из астеносферы Кировоградского протоастенолита. В результате рассредоточенных дифференцированных перемещений материала по латерали происходило его разлинзование, расслоение, которое, вероятно, усиливалось внедрением магматических силлоподобных интрузий глубинного происхождения [21].

Как уже отмечалось, в центральной части Украинского щита отработана система взаимно пересекающихся профилей КМПВ-ГСЗ, расположенных с интервалом 25–40 км [22]. Одним из главных результатов исследований, на наш взгляд, явилось обнаружение на сравнительно небольшой площади сложного и пересеченного рельефа раздела М, нарушенного глубинными разломами разных углов падения: от вертикальных до субгоризонтальных. Здесь толщина земной коры изменяется в весьма широких пределах (от 34 до 46 км), причем эти колебания происходят либо плавно, когда раздел М залегает наклонно, либо резко, вследствие нарушения его непрерывности в зонах глубинных разломов.

Не исключено, что такой сложный рельеф поверхности раздела М обусловлен прежде всего высокой степенью детальности исследований КМПВ-ГСЗ и может с определенной степенью вероятности прогнозироваться в пределах других геологических структур. Такое предположение не лишено оснований. Вспомним, что на первых разрезах ГСЗ, полученных 30–35 лет назад по данным малодетальных профильных наблюдений, все глубинные границы, включая и раздел М, изображались в виде непрерывных плавных линий, почти не претерпевавших никаких разрывов.

Бурение Кольской и Криворожской сверхглубоких скважин на Балтийском и Украинском щитах соответственно позволило получить новые данные о глубинном строении, вещественном составе, природе сейсмических границ, скоростных параметрах и т.д.

Основные результаты геолого-геофизических исследований керна Кольской сверхглубокой скважины, пробуренной до глубины 12000 м, можно сформулировать следующим образом [4, II, 12, 23]:

1. Вскрытый скважиной разрез земной коры является дифференциально-слоистым. Представление, что для пород одинакового состава скорость с глубиной закономерно увеличивается (градиентная модель), не подтвердилось. Изучение упругих свойств горных пород в скважине позволило выявить структурные изменения пород под влиянием процессов вторичных преобразований. В верхней части разреза регистрируются максимальные значения скоростей упругих волн, сейсмический разрез имеет обращенный характер с зоной пониженных скоростей в интервале глубин 4500-6835 м.

2. По упругим свойствам уверенно обнаруживается трехслойное деление пород разреза. Первая сейсмическая граница на глубине 4500 м пространственно почти совпадает с границей между зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фациями метаморфизма. Эта граница имеет особое значение, так как ниже нее первичный состав пород в целом сохраняется, а сланцеватость резко возрастает. Наблюдается соответственно увеличение степени анизотропности пород. Вторая граница (глубже 6835 м) более четко фиксируется по плотностным и ядерно-физическим свойствам, в сравнении с упругими, что может быть связано с общими для протерозоя и архея процессами деформации и метаморфизма.

3. Для архейского комплекса пород корреляционная связь в разрезе между степенью гранитизации и упругими свойствами пород не установлена. Отсюда следует, что литолого-стратиграфические сейсмические границы на больших глубинах маловероятны.

4. В результате дислокационного метаморфизма, начиная с глубины 4500 м, происходит резкое снижение прочностных характеристик и повышение пластичности пород протерозойского комплекса.

5. Основной особенностью сейсмоакустической модели является отсутствие градиента скоростей v_p и v_s до глубины 4500 м. Глубже фиксируется некоторое снижение скоростей упругих волн - отмечается локальный отрицательный градиент. Таким образом, в верхней части земной коры, сложенной древнейшими образованиями, обнаружена зона инверсии упругих (и плотностных) свойств и зафиксирован волновод.

6. В результате сопоставления термодинамических условий залегания вскрытых скважиной пород с расположением фронтов метаморфизма и сейсмических границ установлено, что природа сейсмических границ определяется не литолого-стратиграфической изменчивостью пород, а степенью вторичных преобразований, вызванных изменением физических свойств и состояния вещества земной коры.

7. На глубинах 6500-9500 м обнаружены зоны медной, свинцовой, цинковой и никелевой минерализации, которые всегда рассматривались как неглубокие образования. Этим доказано, что в нижних горизонтах земной коры могут также формироваться полезные ископаемые.

Геолого-геофизические данные, полученные в результате бурения Криворожской сверхглубокой скважины, позволили по-новому представить строение Криворожского железорудного бассейна [3].

Основная часть структуры - саксаганская свита (сланцево-железорудная толща) - представляет собой моноклинальную пластину, погружающуюся в западном направлении. Пластина имеет сложное надвигово-поддвиговое строение, что выражается в наблюдаемой сдвоенности разрезов, наличии шарьяжных зон, так называемых тальковых горизонтов. Следует отметить, что последние контролируют развитие богатых железных руд как надвиговые экранирующие структуры. Рудоконтролирующей роли этих структур ранее не придавалось определяющего значения, предполагалось влияние на развитие богатых руд различного рода флексур, изгибов, складок, структур будинажа, сложных зон гипергенного окисления.

С запада на рассматриваемую моноклиналь по крупной шарьяжной зоне надвинуты более древние образования - архейские плагиогранитоиды, несущие на себе более интенсивно метаморфизованные метавулканогенно-осадочные формации ингуло-ингулецкой серии (артемовская и зеленореченская свиты), включающие железорудные толщи. Ранее они относились геологами к якобы западным крыльям единой Криворожской синклинальной структуры. С учетом полученных данных их можно рассматривать в качестве автономной синклинорной структуры, образовавшейся в иных, чем собственно криворожская полоса, структурно-фациальных условиях.

Новые представления о строении Криворожско-Кременчугской зоны открывают дополнительные перспективы поисков железных руд в северной части Кривбасса и под надвиговыми экранирующими горизонтами.

В связи с бурением Криворожской сверхглубокой скважины в этом районе Украинского щита Центральной геофизической экспедицией (М.А.Бородулин) в 1986-1990 гг. были выполнены глубинные исследования методом ОГТ общим объемом 1000 км сейсмических профилей. Максимальные времена регистрации достигали 20-30 с, что позволило изучить литосферу до глубины 80-120 км и выявить ряд характерных особенностей ее строения. Основные результаты проведенных исследований заключаются в следующем:

1. В толще консолидированной коры и верхней мантии не регистрируются выдержанные непрерывные отражающие границы. Отражения протяженностью 1-2 км прослеживаются в виде групп шириной до 1-2 с (3-6 км). В ряде случаев протяженность групп составляет несколько десятков километров.

2. Выделены горизонтальные и наклонные отражающие границы с углами наклона до 60-70°.

3. Сравнение экспериментальных данных с модельными расчетами показало, что выделенные группы отражений соответствуют слоисто-инверсионным пачкам с детерминированно-стохастической структурой

4. В области перехода кора - мантия, который имеет плавный характер, выделяется группа горизонтально залегающих отражающих элементов с изменяющейся структурой. Граница М, зарегистрированная по данным ГСЗ, совпадает с нижней частью переходной зоны кора - мантия. В ряде случаев граница М залегает в верхней или средней части переходной зоны.

5. В земной коре выделяются многочисленные группы наклонных отражающих элементов, которые на основании пространственной корреляции с геологическими структурами отождествляются с тектоническими нарушениями.

6. Наклонные границы прослеживаются, как правило, в верхней части коры до глубины 10-15 км и в нижней ее части в интервале 25-40 км (граница М). В отдельных случаях наклонные границы могут быть прослежены через всю толщу коры. В средней коре (глубины 15-25 км) выделяются прерывистые горизонтальные границы.

7. С учетом структурного положения отражающих границ земная кора может быть разделена на три слоя. В большинстве случаев структурные формы деформационно-тектонического характера верхней (первый слой) и нижней (третий слой) частей коры не прослеживаются через всю ее толщу. В средней коре (второй слой) наблюдается изменение ее структуры.

8. Наклонные границы, которые пересекают контакт кора - мантия, можно рассматривать как трещины отрыва (разломы), которые образовались в условиях горизонтального сдвига по поверхности верхней мантии.

Балтийский щит занимает площадь около 1100 тыс.км^2 и представляет собой наиболее крупный выступ раннедорифейского фундамента Восточно-Европейской платформы. Современный эрозионный срез вскрыл здесь кристаллические горные породы, испытавшие неоднократные эндогенные преобразования. Во внутренних районах щита, за исключением Ботнического залива и Белого моря, они подняты выше нулевых отметок и часто слагают холмистые или низкогорные ландшафты, наблюдаются в скальных обнажениях или перекрываются лишь маломощным плащом антропогеновых образований. По периферии щит погружается под рифейско-фанерозойские отложения [21].

Внутренняя структура Балтийского щита сформирована главным образом в свекокарельскую - позднесвекокарельскую тектонические эпохи. В ее составе различают три главные геотектонические провинции: центральную, или Свекофеннскую, западную - Дальсландскую, и восточную - Лапландско-Кольско-Карельскую. Отличаются эти провинции составом, строением и, прежде всего, геологической историей, в совокупности образуют закономерную асимметричную зональность с разным возрастом событий, завершающих корообразование.

В центральной части Балтийского щита, исключая область развития каледонид, существует значительная отрицательная аномалия силы тяжести. Таким образом, в коре и верхней мантии, пространственно приуроченной к ядру щита, существует область разуплотнения [21].

Региональные особенности магнитного поля Балтийского щита по данным наземных съемок уверенно отождествляются с различными геологическими структурами [5].

Сейсмические исследования проводятся на территории Балтийского щита более 30 лет. Сейсмические профили подразделяются на три типа: опорные с полной системой годографов ГСЗ, с системой годографов только отраженных волн и только преломленных волн (рис.5).

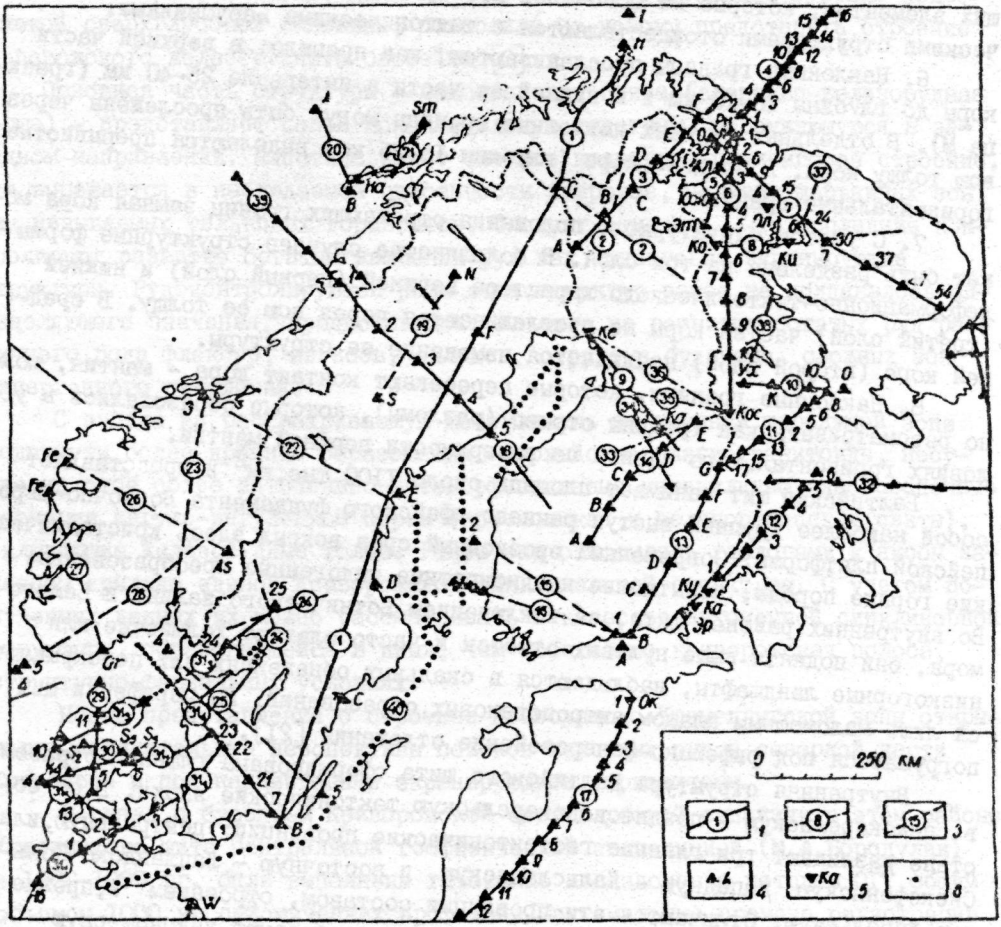


Рис.5. Схема расположения глубинных сейсмических профилей на Балтийском щите и его склонах

1 – профили с системой годографов преломленных и отраженных на поверхности М волн; 2 – профили с системой годографов только отраженных волн; 3 – профили с системой годографов только преломленных волн; 4 – пункты взрывов; 5 – промышленные взрывы в карьерах; 6 – пневмоисточники; (1)–(40) – профили: Феннолора (1), Финлеп (2), Полар (3), Рыбачий – Земля Франца-Иосифа (4), Печенга – Ловно (5), Печенга – Ковдор – Костомукша (6), Печенга – Умбозеро – Ручьи (7), Ковдор – Кировск (8), Кеми – Каяни (9), Кемь – Ухта (10), Кемь – Тулос (11), Лахденпохья – Сегозеро (12), Балтик (13), Свека (14), Трансскандинавский 1-2 (15), Силен – Порво (16), Кохтла-Ярве – Советск (17), Голубая дорога (18), профиль в Шведской Лапландии (19), Лофотен – Северная Норвегия (20), Лофотен – Вестеролен (21), Трансскандинавские 2-3, 3-4, 2-4, 3-5 и 4-5 (соответственно 22, 23, 24 и 25), Флора – Оснес (26), Федья – Гримстед (27), Канобе (28), Скагеррак – Ютландия (29), Ютландия, профиль ПВ 1 – ПВ 6 (30), ЕУГЕНО-С, пять профилей (31), Костомукша – Нижний Тагил (32), Костомукша – Свека (33), Кеми – Сиилинярви (34), Костомукша – Оулу (35), Кеми – Костомукша (36), Кировск – Дальние Зеленцы (37), Кировск – Костомукша (38), Голубая дорога (39), БАБЕЛ (40)

В толще земной коры Балтийского щита выделены сейсмические границы, слои с пониженными скоростями, глубинные разломы, определяющие слоисто-бло ковое строение коры.

В различных геолого-тектонических районах установлено неполное соответствие скоростных и геологических границ, иногда на значительных площадях. Так, вдоль всего профиля Свека в верхней части земной коры обнаружено существование зон скоростной инверсии, характеристики и мощность которых различны [32, 35]. В южной части профиля Полар на глубинах 7-13 км установлена зона пониженной скорости (6,1 км/с) протяженностью до 200 км. Можно предположить, что локальные и более протяженные волноводы являются не исключением, а правилом для сложных слоисто-блоковых разрезов консолидированной коры Балтийского щита.

На ряде профилей ГСЗ в пределах Балтийского щита обнаружены высокоскоростные слои: Печенга - Ковдор - Костомукша, Полар, Никель - Умбозеро - горло Белого моря и др. Слои распространены неповсеместно и располагаются в низах коры. Глубина кровли слоев, расположенных над разделом М, изменяется от 25 до 50 км. Скорость внутри слоя изменяется от 7,2 до 7,8 км/с. Мантия на участках развития высокоскоростных слоев характеризуется повышенными значениями граничной скорости (8,2-8,5 км/с) [31, 32, 35].

Мощность земной коры Балтийского щита изменяется в весьма широких пределах: от 26 до 60 км. Так же, как и для Украинского щита, характерно в общем уменьшение мощности коры по мере перехода к сопредельным структурам.

Широкое использование отраженных волн при интерпретации данных ГСЗ, впервые опробованное на Балтийском щите для изучения крутопадающих границ, позволило значительно повысить информативность сейсмических исследований глубинного строения древнейших складчатых регионов нашей планеты. Сопоставление материалов ГСЗ по Балтийскому и Украинскому щитам свидетельствует о сходстве структуры зарегистрированных волновых полей и общих закономерностях глубинного строения рассматриваемых щитов. К их числу относят среднюю мощность консолидированной коры (42-45 км), широкий диапазон ее изменения (30-65 км), наличие горизонта K_2, делящего кору на две части в приблизительном отношении 1:2, развитие крутопадающих границ в верхней части коры и субгоризонтальную расслоенность нижней, тождественность изменения с глубиной скоростных свойств среды. Детальные исследования строения Украинского щита позволяют прогнозировать для Балтийского щита увеличение мощности коры складчатых блоков и ее снижение в пределах древних срединных массивов и протоастенолитов, изменение характера слоистости в различных блоках, развитие слоисто-инверсионных образований в нижней коре, наличие крупной неоднородности в верхней мантии под Балтийским щитом.

Несмотря на значительную удаленность друг от друга (более 1000 км), ряд геологических объектов Балтийского и Украинского щитов имеет подобные геологические и геофизические признаки. Это относится прежде всего к Выборгскому гранитному массиву рапакиви (Балтийский щит) и к Корсунь-Новомиргородскому и Коростенскому плутонам (Украинский щит).

Так, в районе Выборгского массива, как и на участке Корсунь-Новомиргородского плутона, резко растет скоростная дифференциация и расслоенность

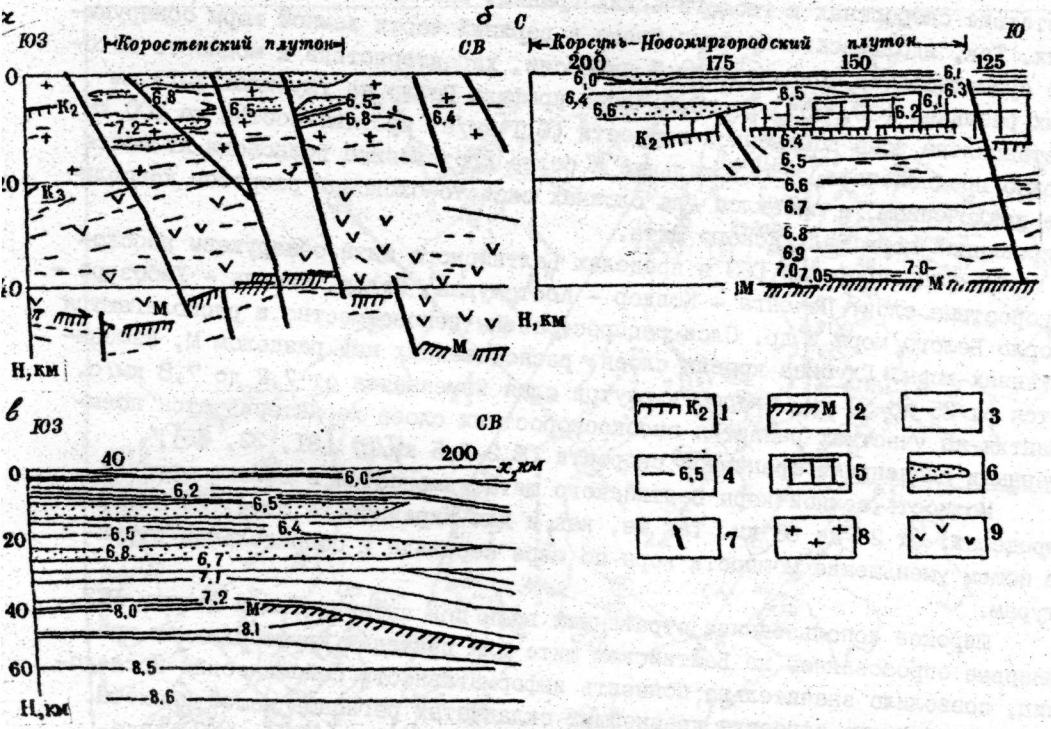


Рис.6. Сейсмические разрезы земной коры массивов габбро-лабрадоритов и гранитов рапакиви Украинского и Балтийского щитов: а – Коростенского, б – Корсунь-Новомиргородского, в – Выборгского

1 – поверхность древнего протофундамента (?); 2 – раздел М; 3 – отражающие площадки в земной коре и верхней мантии; 4 – изолинии скоростей в километрах в секунду; 5 – слой с пониженной скоростью; 6 – высокоскоростные слои в верхней и средней частях земной коры; 7 – разломы; 8 и 9 – кислые и основные породы соответственно

коры во всем диапазоне глубин от 4 до 40 км (рис.6). В верхах коры, подобно Коростенскому и Корсунь-Новомиргородскому плутонам, на глубинах до 10–15 км выделяются высокоскоростные (6,6–6,8 км/с) выклинивающиеся слои небольшой мощности, как бы внедренные в низкоскоростной вмещающий субстрат [22, 26, 35]. Наиболее вероятно, что это глубинные силлообразные интрузии пород основного состава, использующие для своего внедрения субгоризонтальные ослабленные зоны.

Наряду с очевидным сходством закономерностей глубинного строения Балтийского и Украинского щитов, имеются существенные расхождения в их мегаструктуре, обусловленные, по-видимому, тем, что Украинский щит расположен в области сочленения Восточно-Европейской платформы с альпийским складчатым поясом, а Балтийский – с раннепротерозойской Грампианской геосинклиналью. Это, однако, предмет специального исследования, базирующегося на изучении потенциальных геофизических полей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Взаимоотношение и природа сейсмических границ Балтийского щита / И.В.Литвиненко, С.А. Анкудинов, М.Д.Лизинский, Л.Н.Платоненкова // Геофизика. Геология и катастрофические природные явления. Геология континентальных окраин / Междунар. геолог. конгр. 26-я сессия. М.: Наука, 1980. С. 25-31.

2. Гамбурцев Г.А. Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 462 с.

3. Геодинамическая модель центральной части Украинского щита и Криворожская сверхглубокая скважина / А.В.Чекунов, В.Б.Соллогуб, Л.С.Гарецкий, Н.С.Курлов // Геофизический журнал. 1989. Т. 11. № 4. С. 3-13.

4. Геофизические и геохимические исследования глубинных зон земной коры. М.: Недра, 1983. 176 с.

5. Глазнев В.Н., Раевский А.Б., Филатова В.Т. Намагниченность земной коры Балтийского щита по данным обращения магнитного поля /: Тез. докл. 3-го Всесоюз. съезда по геомагнетизму. Киев: Наукова думка, 1986. С. 27-28.

6. Глубинное сейсмическое зондирование на территории Балтийского щита / Ю.Н.Грачев, И.В.Литвиненко, М.Я.Дехнич, К.А.Некрасова // Сейсмические исследования: Сб. статей. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 47-54.

7. Глубинное строение земной коры Белозерского района по данным сейсмических исследований / В.Б.Соллогуб, А.В.Чекунов, Л.Т.Калюжная и др. // Геофизический сборник / Ин-т геофизики АН УССР. Киев, 1966. Вып.18. С.3-18.

8. Земная кора восточной части Балтийского щита / Под ред. К.О.Кратца. Л.: Наука, 1978. 231 с.

9. Калюжная Л.Т. Строение Белозерского железорудного района по геофизическим данным // Глубинное строение рудоносных районов Украинского щита (по геолого-геофизическим данным). Киев: Наукова думка, 1976. С. 19-30.

10. Калюжная Л.Т., Соллогуб В.Б., Чекунов А.В. Глубинное строение земной коры в районе Коростенского плутона по данным сейсмических исследований // Геофизический сборник / Ин-т геофизики АН УССР. Киев. 1968. Вып.25. С.31-46.

11. Козловский Е.А. Комплексная программа глубинного изучения земных недр // Сов. геология. 1982. № 9. С. 3-12.

12. Кольская сверхглубокая / Ред. Е.А.Козловский. М.: Недра, 1984. 490 с.

13. Литвиненко И.В. Новые сейсмические данные о строении земной коры Балтийского щита // Докл. АН СССР. 1963. Т. 149. № 6. С. 1409-1411.

14. Литвиненко И.В. Особенности строения земной коры восточной части Балтийского щита // Геологические результаты прикладной геофизики. М.: Недра, 1965. С. 70-74.

15. Литвиненко И.В. Методика изучения сейсморазведкой сложных структур верхней части консолидированной коры материков // Записки Ленингр. горн. ин-та. 1971. Т. 61. Вып. 2. С. 21-36.

16. Литвиненко И.В. Сейсмические границы консолидированной коры Балтийского щита // Записки Ленингр. горн. ин-та. 1984. Т. 101. С. 3-9.

17. Литвиненко И.В., Анкудинов С.А., Платоненкова Л.Н. Строение земной коры Карелии и Кольского полуострова по данным ГСЗ // Строение земной коры и верхней мантии по данным сейсмических исследований. Киев: Наукова думка. 1977. С. 53-56.

18. Литвиненко И.В., Кокорина Л.К. Строение земной коры Печенгского района // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л.: Наука, 1968. С. 23-26.

19. Литвиненко И.В., Меламуд М.Е. Эффективность метода отраженных волн при рекогносцировочно-площадном изучении глубинного строения Печенгской структуры // Записки Ленингр.горн.ин-та. 1976. Т.69. Вып.2. С.3-11.

20. Литвиненко И.В., Некрасова К.А. Особенности глубинного сейсмического зондирования на Балтийском щите // Глубинное сейсмическое зондирование земной коры в СССР. Л.: Гостоптехиздат, 1962. С. 187-206.

21. Литосфера Центральной и Восточной Европы. Восточно-Европейская платформа. Киев: Наукова думка, 1989. 187 с.

22. Литосфера Центральной и Восточной Европы. Геотраверсы IУ, У1, УIII. Киев: Наукова думка, 1988. 172 с.

23. О возможной природе глубинных сейсмических границ / Е.В.Карус, О.П.Кузнецов, Ю.И.Кузнецов, В.Д.Нартикоев // Докл. АН СССР. 1982. Т. 265. № 3. С. 577-579.

24. О глубинном строении Коростенского плутона по сейсмическим данным / В.Б.Соллогуб, А.В.Чекунов, Л.Т.Калюжная, Л.А.Хилинский // Докл. АН СССР. 1963. Т. 152. № 5. С. 1215-1217.

25. Проблемы комплексной интерпретации геолого-геофизических данных / Под ред. В.А.Глебовицкого, Н.В.Шарова. Л.: Наука, 1990. 224 с.

26. Сейсмическая модель верхней литосферы Украинского щита / А.В.Чекунов, А.А.Трипольский, В.С.Гейко и др. // Докл. АН СССР. 1986. Т. 291. № 2. С. 440-443.

27. Соллогуб В.Б. Литосфера Украины. Киев: Наукова думка, 1986. 184 с.

28. Сопоставление профилей ГСЗ на юго-востоке Балтийского щита / Н.В.Шаров, И.П.Косминская, И.Я.Азбель и др. // Геотектоника. 1990. № 1. С. 46-54.

29. Сравнительная характеристика глубинной структуры земной коры Индийского, Украинского и Балтийского щитов / В.Б.Соллогуб, А.В.Чекунов, Г.Е.Харечко и др. // Региональные комплексные геофизические исследования земной коры и верхней мантии. М.: Радио и связь, 1984. С. 109-116.

30. Строение верхней части кристаллической коры в районе Овручского синклинория по сейсмическим данным / В.Б.Соллогуб, А.В.Чекунов, Л.Т.Калюжная, Л.А.Хилинский // Геофизический сборник Ин-та геофизики АН УССР. 1965. Вып. 1 (12). С. 18-26.

31. Delailed studies of the crustal structure of the Baltic shield in Finland by DSS method / Guterch A., Materzok R., Perchuc E. et al. // Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences. 1985. A-16 (175). P. 3-12.

32. Grad M., Luosto U. Seismic models of the crust of the Baltic shield along the Sveka profile in Finland // Annales Geophysicae. 1987. V. 53(6). P. 639-649.

33. Dohr G. Zur Reflexionsseismischen Erfassung sehr tiefer Unstetigkeitsflächen // Erdoel und Kohle. 1957. V. 10. P. 278-281.

34. Dohr G. Ein Beitrag der Reflexionsseismik zur Erforschung des Tieferen Untergrundes // Geol. Rundsch. 1957. V. 46. P. 17-26.

35. Luosto U. Seismic data from the northern segment of the EGT and from the nearby profiles // Proceedings of the Sixth Workshop on the European Geotraverse (EGT) Project. Data compilations and synoptic interpretation. Edited by R. Freeman and St. Mueller. 1990. P. 53-63.

36. Mooney W. D., Brocher T. M. Coincident seismic reflection / refraction studies of the continental lithosphere: a global review. Reviews of Geophysics. 1987. V. 25, N 4. P. 723-742.

37. Reichenbach R., Schmidt G. Results of surface reflection seismic measurements in the siderite of the Sigerland // Geophysical Prospecting. 1959. V. 7, N. 3. P. 117-139.

38. Schulz G. Reflexionen aus dem kristallinen Untergrund des Pfalzer Berglandes // Z. Geophys. 1957. V. 23. P. 225-235.

39. Seismic Probing of Continents and their Margins. Selected Papers. Edited by J. H. Leven, D. M. Finlayson, C. Wright // Tectonophysics. 1990. V. 173 (special issue), N 1 - 4. 641 P.

40. Early results from the BABEL Project - Baltic and Bothnian Echoes from the Lithosphere / Snyder D., Berthelsen A., Klemperer S. et al. // Proceeding of the XV General Assembly of the European Geophysical Society. Annales Geophysicae, special issue. 1990. P. 38-39.

41. Warner M., McGeary S. Seismic reflection coefficients from mantle fault zones // Geophysical Journal of Royal Astronomic Society. 1987. V. 89. P. 223-230.