Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. LXXXIX, 1981 г.

УДК 550.834.5:551.24

# СОПОСТАВЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ О ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ИСЛАНДИИ И БАЛТИЙСКОГО ЩИТА

С.М.ЗВЕРЕВ, И.В.ЛИТВИНЕНКО

Исландия и Балтийский щит имеют существенно различное геологическое строение, хотя в обоих регионах на поверхность выходят высокоскоростные породы консолидированной земной коры. Исландия - молодая вулканическая страна, сложена преимущественно основными породами - базальтами, кислые разности пород занимают в разрезах лишь около 10 %; возраст изученных здесь толщ не превышает 12-16 млн.лет. Верхняя часть коры древнего докембрийского Балтийского щита, наоборот, на 80-90 % представлена кислыми породами - гранитоидами. Возраст большинства пород кристаллического щита колеблется обычно в пределах от 1650 до 2700 млн.лет и более. Таким образом, весь изученный разрез вулканогенных толщ Исландии в возрастном отношении составляет лишь малую часть разреза щита.

Платобазальты Исландии полого падают в сторону к рифтовой зоне, на Балтийском щите развиты сильно дислоцированные метаморфизованные комплексы - гнейсы и кристаллические сланцы. Древний щит в процессе длительного развития был подвергнут нескольким циклам тектогенеза, в результате чего в его разрезах сформировалось несколько структурных этажей. Для него характерны пояса карельской складчатости, в которых развиты многочисленные приразломные, сравнительно узкие прогибы, выполненные мощными вулканогенно-осадочными толщами. Консолидированная кора щита разбита многочисленными тектоническими нарушениями, различающимися по времени формирования и имеющими разную глубину заложения. Тектонические нарушения на щите часто выражены зонами мелонитизированных пород, и многие из них инъецированы магматическими образованиями.

Балтийский щит уже давно детально исследуется сейсмическими методами [1, 2, 3], в то время как молодые вулканические районы, подобные Исландии, до последнего времени этими методами детально не исследовались.

В 1976-1978 гг. Комплексная геолого-геофизическая экспедиция АН СССР провела детальные сейсмические исследования платобазальтовых и рифтовых районов Исландии силами сотрудников Ленинградского горного института и

Института физики Земли АН СССР. Приводимые ниже данные основаны на материалах этих исследований. Сопоставление сейсмических данных о строении верхней части земной коры Исландии и Балтийского щита представляет не только методический, но и геологический интерес, поскольку дает возможность оценить сейсмогеологические условия различной консолидированной коры на существенно разных стадиях ее формирования.

Сравнение имеющихся волновых полей и других сейсмических характеристик для Исландии и Балтийского щита, использующее опыт исследований на Балтийском щите, позволяет понять и объяснить черты сходства и различия сейсмических материалов. Такое сопоставление проведено в первую очередь для тех районов Балтийского щита, где имеются вулканогенно-осадочные толщи, наиболее близкие к геологическим образованиям Исландии.

Методика сейсмических исследований в Исландии и на Балтийском щите была сходной. Применялась стандартная многоканальная сейсмическая аппаратура с магнитной записью, группы сейсмоприемников расставлялись на профиле через 25-100 м. Проводилось непрерывное профилирование с использованием пунктов взрывов, расположенных в Исландии через каждые 7-15 км, а на Балтийском щите иногда чаще. Условия возбуждения в обоих регионах были различными. На щите большинство пунктов взрыва (ПВ) создавались в обводненных осадочных отложениях морены, реже - на заболоченных участках обнажений коренных пород. В Исландии взрывы производились в заливах, мелких водоемах, болотах и пустотах лавовых потоков и в целом оказались менее эффективными, особенно в рифтовой зоне, где отсутствуют даже мелкие водоемы. Сейсмические исследования в Исландии были приурочены к дорогам, поэтому профили не были строго прямолинейными. Следует также отметить, что на Балтийском щите такие работы выполнены в значительно больших объемах. Отмеченные различия следует иметь в виду при сопоставлении сейсмических материалов. В то же время ряд особенностей волновых полей оказался сходным.




Рис.1. Расположение профилей детальных сейсмических исследований в Исландии (1976-1978)
I-IУ - сейсмические профили
- - - - границы рифтовой зоны

Обсуждаемые материалы по Исландии относятся к двум районам: юго-западу страны - профили I, II и северу - профили III-IУ (рис.1). В обоих районах профили начинались в платобазальтовой области, где на поверхность выходят третичные базальты, полого наклоненные в сторону рифтовой зоны. Последняя с поверхности покрыта разнообразными продуктами молодого вулканизма [4]. Как на севере, так и на юге, профили достаточно далеко проходили в пределы рифта,

пересекая его осевую часть. Длина профиля I–II на юге составляла 70 км, длина профилей III и IУ соответственно 90 и 25 км. На Балтийском щите из обширных материалов для сопоставления выбраны профили для района Печенгской структуры [I].

Сопоставление волновых полей. Волновые поля для обоих регионов были воспроизведены одинаковым способом переменной ширины. Их сопоставление показало, что и на Балтийском щите, и в Исландии наблюдаются сложные волны в последующих вступлениях, резко отличающиеся от сейсмограмм в районах с осадочной толщей, где существуют более регулярные и устойчивые отраженные волны.

Сейсмические записи, полученные для Балтийского щита и Исландии, имеют следующие общие черты. Это, прежде всего, сравнительно простые первые вступления, обычно прослеживаемые на интервале профиля, достигающем иногда нескольких десятков километров. В последующих частях сейсмограмм наблюдаются волны, частично относящиеся к отраженным, имеющим сложные оси синфазности с разнообразными наклонами. Гиперболическая форма годографов с минимумом над ПВ наблюдается редко. Часто отмечаются случаи пересечения годографов различных волн. В обоих регионах встречаются волны с аномальными кажущимися скоростями, годографы которых примыкают к области первых вступлений.

Сейсмические записи позволили установить различия в характере волн. На Балтийском щите отраженные волны более динамически выражены, регулярны и устойчивы, опорные волны имеют более протяженные оси синфазности, чем в Исландии. В Исландии для осей синфазности отражений характерно бóльшее количество разрывов корреляции. Различие сейсмических записей заключается и в том, что в области первых вступлений на Балтийском щите в диапазоне рассматриваемых длин годографов (I0–60 км) первые волны более стабильны. Они имеют более короткий импульс, прослеживающийся на всем протяжении профиля, и мало изменяющуюся скорость. В Исландии в этом же диапазоне расстояний от ПВ часто отмечаются четкие смены волн в первых вступлениях. Кроме того в Исландии встречено немало ярких примеров диффракции волн в области первых вступлений. Зоны диффракции особенно хорошо проявляются в неовулканической зоне. Волны с гиперболическими годографами, примыкающими к первым вступлениям, повторяются на нагоняющих годографах.

В заключение подчеркнем, что перечисленные выше различия волновых полей являются все же второстепенными на фоне их главного сходства – сложности колебаний в последующих частях сейсмограмм.

Сопоставление годографов первых волн. Для Балтийского щита эти годографы (рис.2) почти прямолинейны, и наклон их мало меняется в пределах базы наблюдения (до 60 км). Кажущаяся скорость $V^*$ первых волн на щите определяется составом горных пород, обнажающихся на линии наблюдений. Наибольшие скорости характерны для профиля, проходящего по основным породам, наименьшие – для гранитоидов, т.е. между величиной скорости волн в первых вступлениях и минералого-петрографическим составом пород есть прямая связь. В Исландии, в пределах той же базы наблюдений, отмечаются четкие смены волн в первых вступлениях. Эти

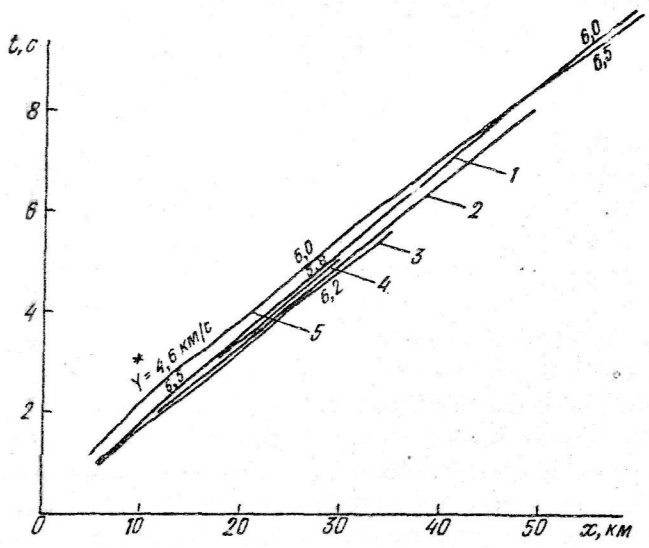



Рис.2. Осредненные годографы первых слабопреломленных волн для восточной части Балтийского щита (1-4) и Исландии (5)
1 - гранитоиды, гнейсы; 2-4 - области развития пород среднего (2, 4) и основного (3) состава; 5 - область развития платобазальтов

смены выделяются по форме годографов и значениям $V^*$, а также по форме записи колебаний.

При анализе материалов наблюдений в Исландии удалось выделить участки годографов, связанные с наблюдаемыми на поверхности отдельными, более плотными лавовыми потоками в платобазальтовой толще, разделенными прослоями с меньшей скоростью. Такие смены волн хорошо повторяются на нагоняющих годографах и приурочены к выклиниваниям отдельных потоков платобазальтов в пределах профиля, точнее - с пересечением поверхностей этих потоков с плоскостью наблюдений.

С увеличением расстояний увеличивается $V^*$ годографов. В толще платобазальтов, состоящей из наклонных слоев, скорость постепенно увеличивается с глубиной, причем это нарастание оказывается сходным для значительных участков профилей в пределах более однородных блоков.

Преломляющие горизонты, построенные для Исландии методом полей времен, на глубинах свыше I,5-2,0 км более пологие, чем наклоны приповерхностных слоев в платобазальтовой толще, и имеют угловое несогласие с ними. Это позволяет предполагать, что природа этих преломляющих границ иная, чем приповерхностных горизонтов, и что они связаны с изменением физических свойств разреза (плотности, пористости, водонасыщенности, степени метаморфизма).

С к о р о с т н ы е  р а з р е з ы. Сопоставление данных (рис.3), полученных при обработке годографов первых волн, со скважинными наблюдениями показывает, что заметный вертикальный градиент скорости отмечается для гранитоидов Балтийского щита.

Для Исландии характерно сложное нарастание скорости с глубиной. На скоростных кривых можно выделить несколько участков с разным наклоном: в разрезе выделяются слои, в которых скорость нарастает по-разному.

Особенности кривых определяются разным составом пород Балтийского щита и Исландии. Базальты в верхней части разреза Исландии характеризуются гораздо меньшими скоростями, чем гранитоиды вблизи поверхности Балтийского щита. В то же время градиент скорости в них более высокий. На глубине около 4-5 км значения скоростей сближаются, и на больших глубинах

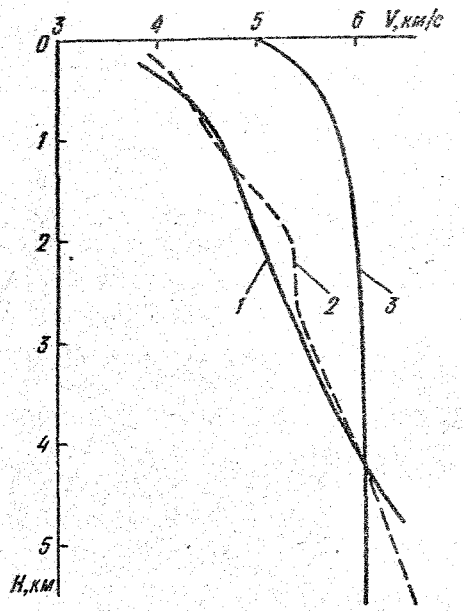



Рис.3. Осредненные графики изменения скорости с глубиной для Исландии (1, 2) и области развития гранитоидов Балтийского щита (3)

для Балтийского щита скорости несколько больше 6 км/с, а для Исландии увеличиваются до 6,5–6,7 км/с, т.е. становятся близкими к скоростям в массивных базальтах.

Такое различие скоростных кривых достаточно ярко отражает различное геологическое строение двух рассматриваемых регионов. Возможно, природа сейсмических преломляющих границ в Исландии до глубин 4–5 км определяется, главным образом, характером метаморфизма молодых базальтовых вулканических толщ. Кривые для южной (рис.3, кривая I) и северной (кривая 2) Исландии в основном сходны, хотя отмечены и некоторые различия. Так, на севере острова можно предполагать по этим графикам наличие преломляющей границы на глубине около 2 км.

С о п о с т а в л е н и е р а з р е з о в. Глубокие отражающие горизонты на разрезах для Исландии и Балтийского щита (рис.4, 5) построены по единой методике. Значительная часть отражающих элементов на разрезах обеспечена двукратным перекрытием, что повышает надежность данных. В обоих регионах отдельные отражающие площадки образуют на разрезе поле, часть которого имеет сравнительно упорядоченный характер. Отражающие границы определяются совокупностью площадок, выстраивающихся в сравнительно протяженные условные горизонты. В Исландии и особенно на Балтийском щите отмечаются отражающие площадки, пересекающиеся между собой, а также площадки с очень крутыми углами наклона.

Природа отражающих элементов лучше изучена на Балтийском щите, где сейсмические исследования проводятся давно и хорошо обеспечены данными геологии и бурения. Здесь отражающие границы разделяют толщи разного состава и возраста. Они часто соответствуют осадочным прослоям в вулканогенных толщах, которые образуют пачки, имеющие резко отличные акустические свойства, но мало влияющие на среднюю скорость. Крутопадающие площадки на Балтийском щите часто также связаны с тектоническими нарушениями. Последние обычно сопровождаются зонами дробления, в которых понижаются скорость и плотность пород. Скачок акустических жесткостей обуславливает наличие отражений. Часто на разрезах удается выделить зоны типа сбросов и надвигов. По сейсмическим данным эти зоны разделяют части разреза с разным характером отражений.

В целом опыт сейсмических и геологических исследований на Балтийском щите показывает, что глубинные отражающие площадки на разрезах имеют не-

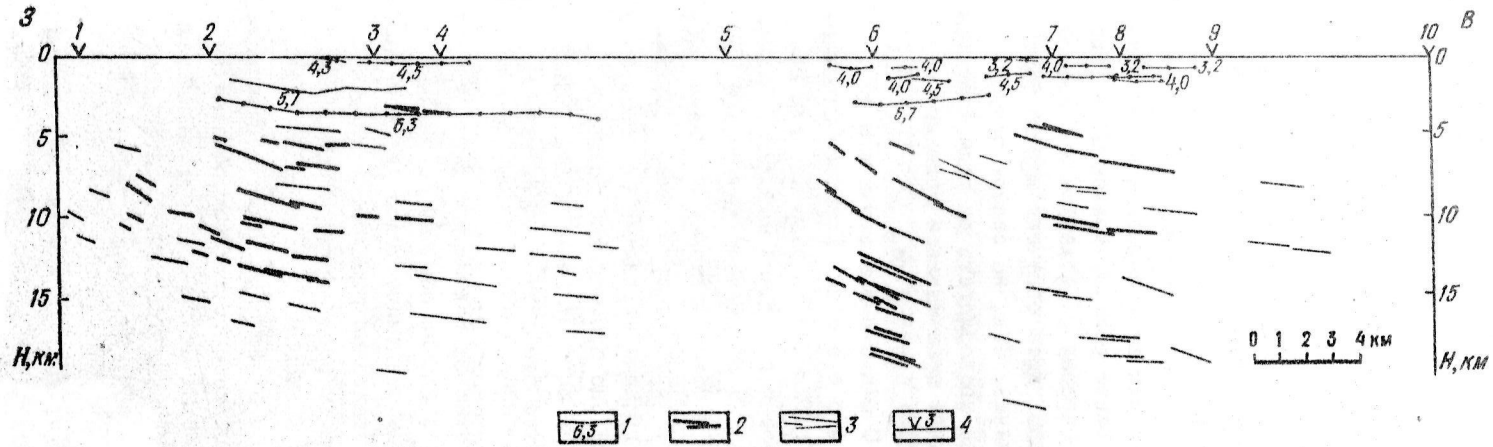



Рис.4. Пример сейсмического разреза для Исландии (профиль III)
1 – преломляющие границы и значения граничной скорости в километрах в секунду; 2 и 3 – отражающие границы, соответствующие интенсивным и слабым отражениям; 4 – пункты взрыва

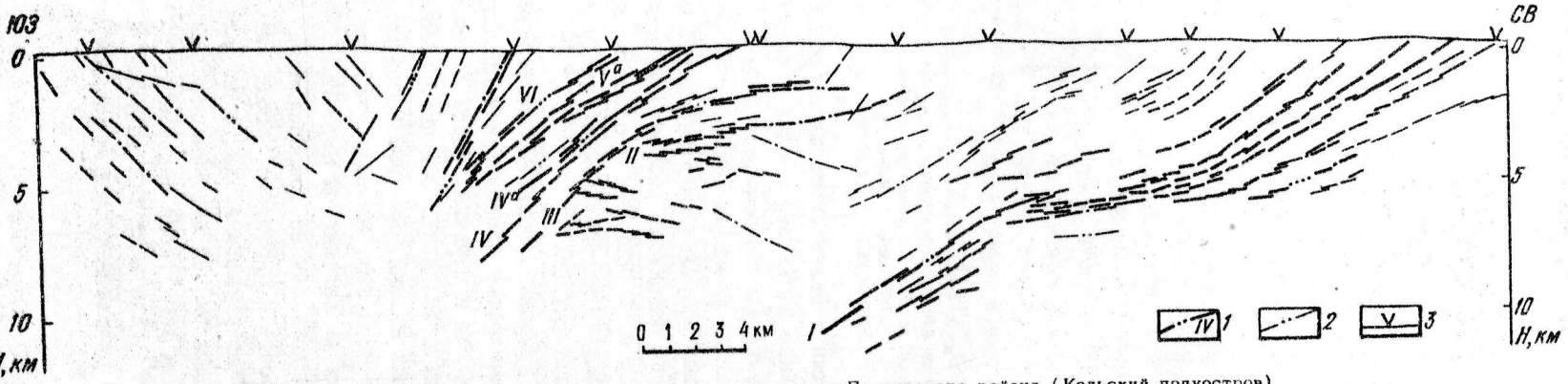



Рис. 5. Пример сейсмического разреза для Печенгского района (Кольский полуостров)
1 – опорные отражающие горизонты; 2 – отражающие горизонты, соответствующие слабым отражениям; 3 – пункты взрыва

посредственную связь с реальными геологическими элементами: контактами пород различного минералого-петрографического состава, зонами различных тектонических нарушений и вторичными изменениями пород.

Исходя из изложенного, можно предполагать, что и в Исландии глубинные отражающие элементы имеют подобное геологическое значение и связаны с поверхностями, где происходят смены состава пород и степени их метаморфизма, а также с зонами нарушений, имеющимися в толщах базальтов Исландии, подстилающих изученные на поверхности более молодые образования.

Если на Балтийском щите в нескольких верхних километрах разреза удается выделить только отражающие элементы слабонаклонного и крутого падения, то характерной особенностью Исландии является наличие преломляющих горизонтов. Часть из них, как уже отмечено, связана с реальной слоистостью платобазальтов и определяется более плотными базальтовыми потоками в этой толще (рис.4, западная часть разреза). Плотные потоки в толще платобазальтов Исландии имеют скорость 4,6-4,7 км/с, глубже их отмечаются сейсмические слои, характеризующиеся скоростями 5,7 км/с и более. Преломляющая граница со скоростью около 6,5 км/с, по данным Г.Пальмасона [5], распространена повсеместно в Исландии и является сильной гравитирующей поверхностью.

В рифтовой зоне Исландии молодые вулканогенные отложения вблизи поверхности имеют скорости около 3 км/с; на разрезе видно, что преломляющие горизонты в рифтовой зоне образуют депрессию с максимальным прогибом вблизи наиболее активной сейчас части рифта. Глубинные отражения здесь образуют структуру, подчиненную приповерхностной депрессии, однако имеющую более крутые углы наклона. Область отсутствия отражений может быть связана с магматическим очагом.

В геологических разрезах Исландии часто встречаются зоны нарушений, причем, как уже упоминалось, часть из них проявляется в сейсмическом поле дифрагированными волнами. При этом зоны дифракции в наиболее выраженном виде связаны не с поверхностными трещинами растяжения, а с плотными интрузивными телами, внедрявшимися в пористые молодые базальты рифтовой зоны.

Редкие случаи подобных явлений на Балтийском щите могут быть объяснены значительно меньшим контрастом физических свойств пород разреза, длительное время подвергавшихся региональному метаморфизму.

Кроме упорядоченных отражающих элементов на сейсмических разрезах в обоих регионах наблюдаются отдельные беспорядочно расположенные площадки. Часть из них сечет более выдержанные границы. По-видимому "беспорядочные" площадки далеко не всегда соответствуют элементам, лежащим в плоскости разреза. Системы наблюдений в Исландии часто оказывались недостаточными для точного определения их положения в пространстве.

Подводя итоги сопоставлению сейсмических данных для Исландии и Балтийского щита, можно дать некоторые объяснения отмеченному выше сходству и различию результатов сейсмических исследований по сходной методике.

Информативность первых сейсмических волн в диапазоне расстояний до 60 км в Исландии выше потому, что толща вулканогенных пород в верхней

части разреза коры значительно больше дифференцирована по свойствам с глубиной, чем на Балтийском щите. Эти породы в Исландии проходят лишь первичные стадии метаморфизма. Изменение физических свойств с глубиной приводит к образованию сейсмической слоистости, хорошо фиксируемой методом преломленных волн.

На Балтийском щите породы, выходящие сейчас на поверхность, прошли разнообразные и длительные процессы метаморфизма и средние значения их физических параметров оказались бо́льшими. Различие глубины залегания дает незначительное изменение физических свойств пород за счет термодинамических условий.

Отраженные сейсмические волны, наблюдаемые на Балтийском щите и в Исландии, имеют определенное сходство. На щите они наблюдаются лучше, что главным образом связано с обилием пачек осадочных пород среди вулканитов, а также с особенностями возбуждения упругих волн. Пачки осадочных пород совершенно отсутствуют в вулканогенных породах Исландии.

Зоны нарушений на Балтийском щите отмечаются в сейсмическом поле, вероятно, потому, что сопровождаются зонами дробления, в которых физические параметры заметно уменьшаются.

В Исландии наиболее распространенные зоны нарушений – трещины растяжения, дайки и сбросы – далеко не всегда сопровождаются заметными зонами изменения физических свойств пород. Трещины растяжения, широко распространенные в рифтовой зоне у поверхности, закрываются на глубинах до первых десятков метров, и контраст физических свойств, необходимый для возникновения сейсмических волн, вероятно, отсутствует как при сомкнувшихся на глубине трещинах, так и при смещении частей базальтовых толщ по вертикали. Зоны трещин растяжения, даек и зоны сбросов небольшой амплитуды оказываются сравнительно однородными для сейсмических волн. Наибольший контраст физических свойств наблюдается при внедрении плотных интрузий в рыхлые молодые вулканогенные толщи, при этом возникают интенсивные дифрагированные волны. Подобные случаи для Балтийского щита менее характерны, может быть, потому, что все свойства пород осреднены влиянием метаморфизма и приобрели относительную однородность.

Не исключено, что некоторые тектонические нарушения на Балтийском щите и в Исландии имеют различные углы падения: на щите многие из них представлены более пологими сколами типа надвигов, а в Исландии – более крутыми. Как известно, возможности изучения крутопадающих элементов разреза методами отраженных и преломленных волн ограничены.

Таким образом, различие сейсмических характеристик разрезов Исландии и Балтийского щита прямо связано с геологической историей развития этих регионов. Сейсмическая слоистость в верхней части разреза Исландии обусловлена первичными стадиями метаморфизма. Сравнительно большая сейсмическая однородность Балтийского щита возникла в результате процессов метаморфизма, осреднивших свойства отдельных пород разрезов. В то же время этапы осадкообразования во время длительной геологической истории щита привели к образованию пачек пород, которые сохранили контраст акустических жесткостей даже после метаморфизма и способствовали образованию от-

раженных волн на Балтийском щите. В целом на Балтийском щите отраженными волнами удается проследить первичные сложные структуры консолидированной коры и наметить вторичные их изменения (тектонические нарушения, метаморфизм и др.).

Для обоих регионов главный тип тектонических движений различен. Для Исландии трещины растяжения, внедряющиеся по ним дайки и сбросы небольшой амплитуды не сопровождаются возникновением неоднородностей, приводящих к образованию сейсмических волн. На Балтийском щите распространены надвиги, сопровождающиеся обширными зонами дробления пород, которые прослеживаются отраженными волнами. Установленное геологическое объяснение глубинных отражающих элементов на Балтийском щите позволяет предполагать, что и в Исландии эти элементы отображают древние структуры Исландии, подстилающие пока малоизученные верхние части разреза ее коры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Восточная часть Балтийского щита, геология и глубинное строение / Под ред. К.О.Кратца. Л., Наука, 1975.

2. Геология и глубинное строение восточной части Балтийского щита / Под ред. К.О.Кратца. Л., Наука, 1968.

3. Литвиненко И.В. Сейсмический метод изучения сложной структуры верхней части континентальной коры. - Зап. ЛГИ, 1971, т. 61, вып. 2.

4. Сейсмические исследования западного рифта в южной Исландии / С.М.Зверев, И.В.Литвиненко, Г.А.Ярошевская, Н.Н.Осокин - Бюлл. МОИП, сер. геолог., 1979, т. 54, вып. 3.

5. P a l m a s o n G. Cristal Stryctyre of Iceland from Explosion Seismology. Reykjavik, 1971.