

Сопоставление геофизических разрезов земной коры с результатами бурения глубоких скважин на Фенноскандинавском щите

© Н. В. Шаров, 2012

Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия
Поступила 24 апреля 2012 г.

Представлено членом редколлегии В. Д. Омельченко

На основі порівняння результатів сейсмічних і акустичних досліджень на Фенноскандинавському щиті з даними, отриманими під час буріння Кольської надглибокої свердловини — 12262 м (1970—1990), Росія; Гравберг — 6337 м (1986—1987), Швеція; Оутокумпу — 2516 м (2004—2005), Фінляндія; Погранична — 5200 м (2004—2006), Росія; Онезька — 3537 м (2007—2009), Росія, обговорено питання природи геоакустичних меж. Обґрунтовано припущення, що кристалічна кора має гетерогенну будову з градієнтними змінами та інверсіями швидкості поширення пружних хвиль, із ступенем диференціації порід, що варіює по вертикалі й латералі. Природа сейсмічних меж зумовлена як відмінністю складу порід, так і їх фізичним станом. Результати геофізичних досліджень глибоких свердловин на Фенноскандинавському щиті примушують дослідників по-іншому ставитися до інтерпретації геолого-геофізичних даних.

The nature of geoacoustic waves is discussed, based on comparison of the results of seismic and acoustic studies in the Fennoscandian Shield with the drilling record of the Kola Superdeep Borehole: 12262 m (1970—1990), Russia; Gravberg 6337 m (1986—1987), Sweden; Outokumpu — 2516 m (2004—2005), Finland; Pogranichnaya — 5200 m (2004—2006), Russia; Onezhskaya — 3537 m (2007—2009), Russia. The assumption that the crystalline crust has a heterogeneous structure with gradient variations and elastic wave velocity inversions and the vertically and laterally varying degree of differentiation is well-based. The nature of seismic boundaries depends on differences in rock composition and the physical state of the rocks. The results of geophysical studies, conducted during deep drilling in the Fennoscandian Shield, make investigators re-interpret the geological and geophysical data.

Введение. Участники совещания Рабочей группы Международного союза геодезии и геофизики (Париж, 19—22 марта 1962 г.) рекомендовали отказаться от применения необоснованной терминологии, согласно которой в земной коре выделяются «гранитный» и «базальтовый» слои, и определять слой скоростью распространения в нем продольных волн. Совещание призвало исследователей при интерпретации материалов сейсмических работ по возможности избегать предварительных предположений о горизонтальной слоистости земной коры [Федынский, Ризниченко, 1962]. Актуальность этих рекомендаций сохраняется и в наше время.

В статье сделана попытка понять природу сейсмических границ в кристаллической коре с учетом материалов глубокого бурения и накопленной геолого-геофизической информации о районе бурения скважин. Проанализи-

рованы результаты бурения глубоких скважин (рис. 1) на территории Фенноскандинавского щита: Кольской, Россия (SG-3) — до глубины 12262 м (1970—1990); Гравберг (GR), Центральная Швеция, — до глубины 6337 м (1986—1987); Оутокумпу (OU), Юго-Восточная Финляндия, — до глубины 2516 м (2004—2005); Пограничной (P-1), Россия, Мурманская обл., полуостров Средний, — до глубины 5200 м (2004—2006); Онежской (ON), Россия, Центральная Карелия, — до глубины 3537 м (2007—2008), которые выявили серьезные несоответствия между прогнозными сейсмогеологическими моделями и фактическим строением верхней части континентальной коры. Глубокие скважины показали, что неоднородности, фиксируемые по геофизическим данным в верхней части кристаллической коры, обусловлены изменениями не только состава глубинных пород, но и их физического состояния. Поэтому определение

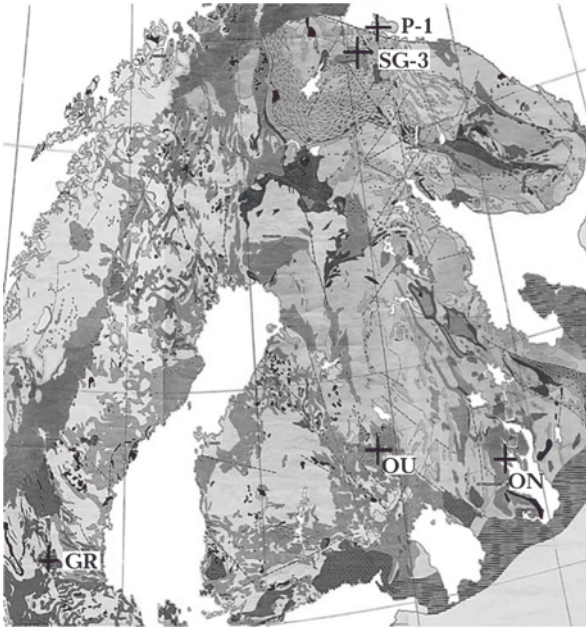


Рис. 1. Фрагмент геологической карты Фенноскандинавского щита [Koistinen et al., 2001] и местоположение глубоких скважин.

даже приближенного состава пород по значениям только скорости распространения упругих волн не может быть однозначным. Вместе с тем сделан вывод о реальности и природе зон пониженной скорости распространения упругих волн в верхней части коры, не подтверждено также увеличение гомогенности слоев с глубиной. Природа внутрикоровых сейсмических границ может быть связана с разными причинами: изменением вещественного состава, различием в структурно-текстурных особенностях пород, термодинамической об-

становкой [Проблемы..., 1991; Шаров, 1993].

Природу геоэлектрических границ в земной коре Украинского щита изучал С. Н. Кулик. Одна из последних его работ — соавторство в коллективной монографии «Криворожская сверхглубокая скважина СГ-8» [Криворожская ..., 2011]. В наши совместные с ним планы входило проведение геоэлектрических исследований в Карелии, в районе Онежской параметрической скважины.

Общая характеристика полученных материалов. Кольская сверхглубокая скважина. Под руководством И. В. Литвиненко проведена детальная сейсмическая съемка в районе Печенги и в 1960—1962 гг. пройден профиль ГСЗ Баренцево море — Печенга—Ловно (рис. 2, а). Эти результаты послужили основой для заложения Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3). Данные позволили оценить результаты исследований методом ГСЗ строения верхней части древней континентальной земной коры [Кольская ..., 1984]. Была развенчана гипотеза о наличии «базальтового» слоя на глубине 5 км под Печенгской структурой, определен реальный состав и сейсмические характеристики среды до глубины 12 км, в том числе обнаружен волновод на глубинах порядка 8—9 км [Кольская ..., 1998; Березовский и др., 2006]. В 1992 г. международным коллективом исследователей (США, Великобритании, Норвегии, России) в Печенгском районе был пройден профиль КОЛА ОГТ-92 с выходом на скв. СГ-3. Информация о структуре земной коры, полученная на профилях МОВ—ОГТ, является принципиально иной по сравнению со старыми данными ГСЗ. Новые исследования показали, что земная

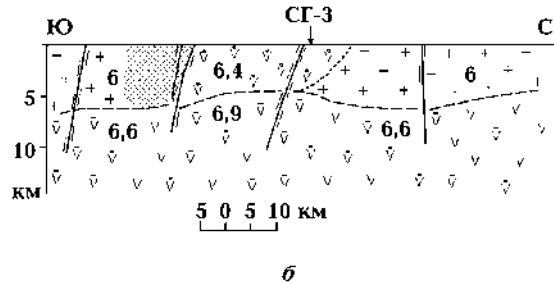
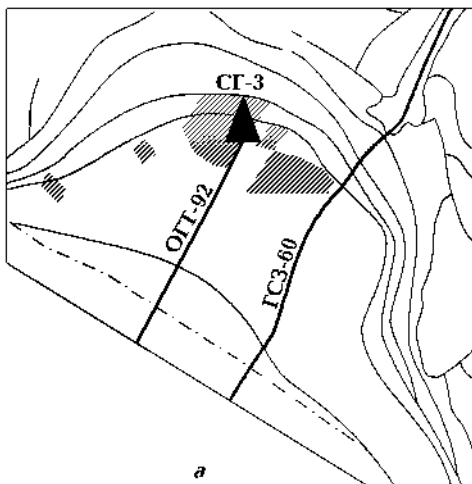


Рис. 2. Схема расположения профилей ОГТ-92, ГСЗ-60 (а) и предварительный сейсмический разрез ГСЗ-60 (б) [Литвиненко, 1963].

кора региона имеет блочно-иерархическое, фрактальное строение [Сейсмологическая ..., 1997].

Необходимо учесть, что со времени отработки профиля Печенга — Ловно, который прошел в 12 км к востоку от устья скв. СГ-3 (рис. 2, а), сильно изменились представления о природе волн, регистрируемых методом ГСЗ. В начале 1960-х годов сейсмические границы, в частности кровля «базальтового» слоя, строились в предположении, что ГСЗ формирует главным образом преломленные волны (рис. 2, б). Позже теоретически и экспериментально было установлено, что волны, принимаемые за пре-

ломленные, во многих случаях являются закритическими отражениями. Вследствие избирательности сейсмических наблюдений на базах ГСЗ прослеживаемые при этом интенсивные волны могут быть сформированы локальными упругими неоднородностями коры, ограниченными как по интервалу глубин залегания, так и по латерали.

Один из неожиданных результатов проходки скважины — доказательство широкого развития минерализованных трещин на всем вскрытом интервале. Наличие трещин на больших глубинах влияет на физические характеристики пород не только прямым образом. При

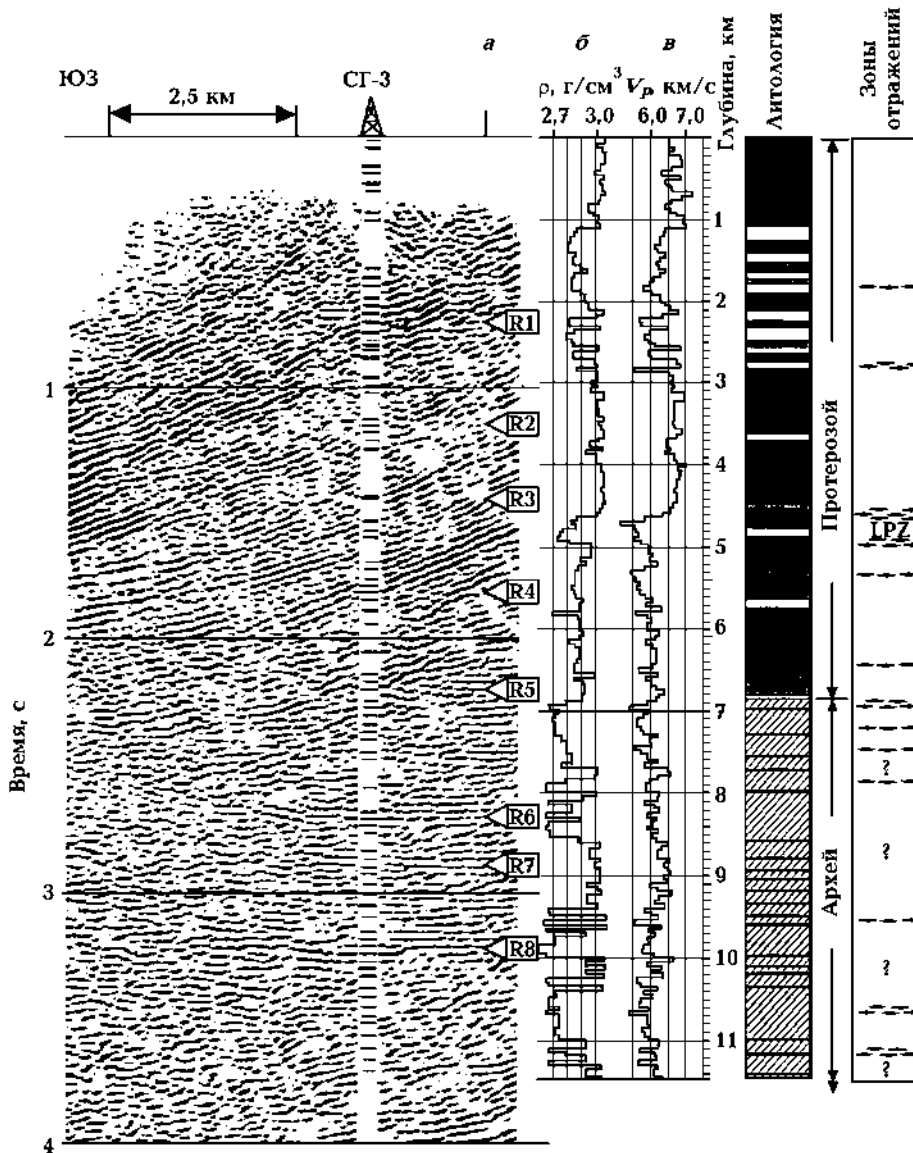


Рис. 3. Сопоставление данных сейсморазведки, плотностных и упругих свойств горных пород по скв. СГ-3 [Сейсмогеологическая ..., 1997]: а — северная часть мигрированного разреза по профилю КОЛА ОГТ-92; б — график распределения плотности ρ горных пород; в — график скорости распространения продольных волн по данным АК.

повышенной проницаемости порода подвергается активному воздействию флюидов, что может существенно изменять ее состав и степень вторичных преобразований.

Вертикальная мощность печенгского комплекса в районе скв. СГ-3 составила 6800, а не 4700 м, как это определялось ранее по данным гравиразведочных и сейсмических работ [Литвиненко, 1963]. Бурение скв. СГ-3 показало, что принятая на стадии ее проектирования наклонная сейсмическая граница отражает не подошву печенгского комплекса, а крупный межслоевой разлом (рис. 3). Вертикальная мощность гнейсов кольской серии по скв. СГ-3 составила 4900 м (от 6800 до 11700 м). С глубины 7300 м на всем протяжении разреза степень насыщенности гнейсовых толщ амфиболитами возрастает от 15 до 40%. Под гнейсовыми образованиями в интервале 11 700—12 236 м вскрыт древний фундамент, или комплекс архейского основания. Его можно рассматривать как низы гранитно-метаморфического слоя либо

как верхнюю часть нового (диоритового) слоя [Кольская ..., 1998].

Установлено, что данные о скорости распространения продольных волн в среде, полученные при широкополосном акустическом каротаже, сопоставимы с результатами сейсмических исследований ВСП в скв. СГ-3 (рис. 3, 4), отмечено существенное их различие с графиком скорости $V(H)$, определенной по годографам первых волн в методе ГСЗ на профиле Печенга—Ловно [Кольская ..., 1998]. Осреднение кривой АК на базе, соизмеримой с длиной волны колебаний, используемых в ВСП, дает хорошую сходимость скоростных моделей АК и ВСП. Рассмотрена трехслойная модель среды с выделением двух контактов: в низах заполярной свиты (глубина 4500 м) и подошвы протерозойского комплекса (глубина 6842 м). В слое I значения V_p по данным АК и ВСП различаются незначительно, совпадают интервалы относительного снижения и повышения скорости. В слое II значения скорости

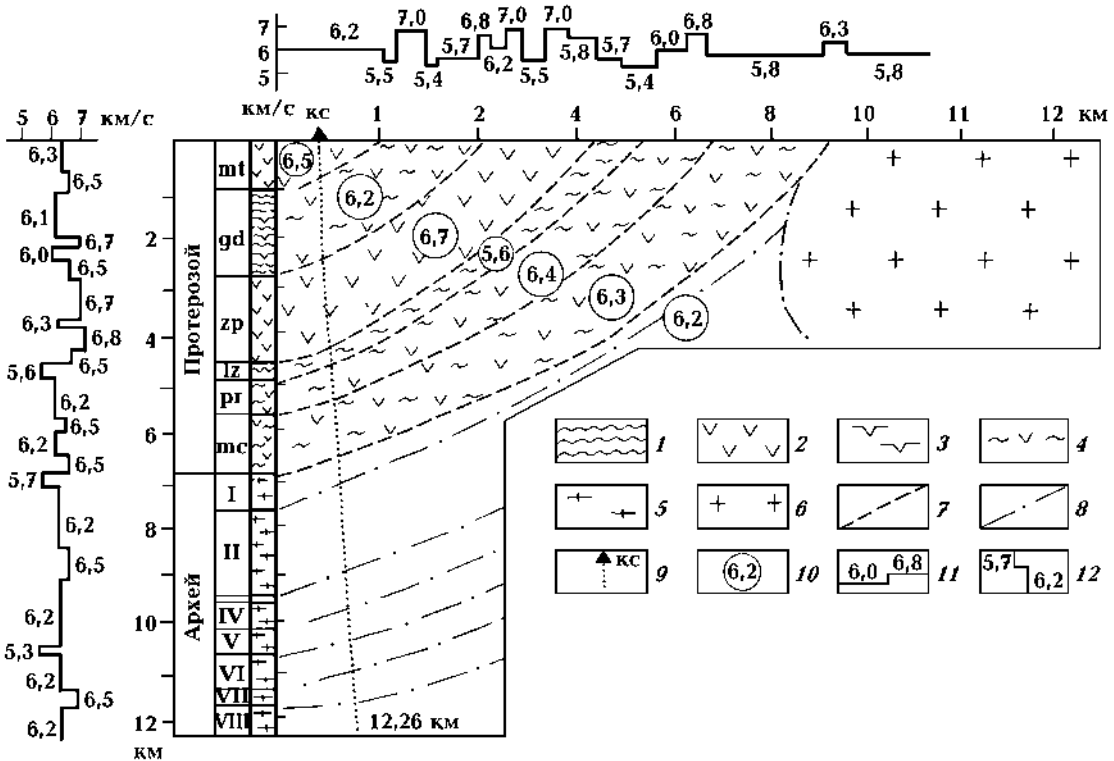


Рис. 4. Сейсмогеологическая модель участка бурения Кольской скважины СГ-3 [Проблемы ..., 1991]: 1 — метаморфизованные осадочные породы; 2 — эффузивы, 3 — интрузивы; 4 — аподиабазовые сланцы; 5 — породы гнейсового комплекса; 6 — граниты. индексы свит (протерозой) и толщ (архей) соответствуют работе [Кольская ..., 1984]; 7 — границы слоев скоростной модели; 8 — контакты толщ архейского комплекса по геологическим данным; 9 — схема расположения скважины; 10 — значения скорости в слоях модели, км/с; 11 — скорость распространения продольных волн вдоль профиля МОВ, км/с; 12 — скорость распространения продольных волн по ВСП, км/с.

по данным АК на 2,5 % ниже, чем по данным ВСП, интервалы значительных повышений V_p не выделены. В слое III V_p по данным АК существенно ниже, чем по данным ВСП (разница до 15 %).

Скорость $V(H)$ по данным ГСЗ плавно увеличивается с глубиной — от 6,0 км/с при глубине $H=1$ км до 6,1—6,2 км/с при $H=11$ км. Сравнение кривых $V(H)$ по данным ГСЗ и АК показывает их существенное различие и по величине скорости, и по характеру ее изменения с глубиной. Это можно объяснить следующим: метод ГСЗ предусматривает использование низких частот (1—20 Гц) и проведение измерений на больших горизонтальных базах (50—300 км), что обуславливает осреднение свойств среды [Кольская ..., 1998].

На рис. 4 представлены варианты увязки скоростных разрезов по наземному и вертикальному сейсмическим профилям для генерализованной модели разреза скв. СГ-3. Значения скорости распространения продольных волн, измеренной на земной поверхности и в стволе скв. СГ-3, сопоставлены для крупных стратиграфических свит. Вся толща пород протерозоя представляет собой высокоскоростной косослоистый блок, который по отношению к нижележащей архейской толще является сейсмическим экраном. При этом в районе скважины выявлена купольно-блоковая структура архейского комплекса, осложненная крутопадающими и субвертикальными глубинными разломами. Этот разрез коренным образом отличается от традиционных представлений о связи глубинных сейсмических разделов кристаллической коры с мощными горизонтальными слоями.

В целом разрез скв. СГ-3 типичен для карелид щита и других его структур, где в верхней части залегают породы со скоростью распространения упругих волн большей, чем в нижележащих образованиях. Нижняя часть разреза скв. СГ-3 (архейский гнейсовый комплекс) по преобладающему значению скоростей на глубине 7—12 км сходна с типичными гнейсовыми комплексами Фенноскандинавского щита. Увеличение скоростей вблизи поверхности на щите связано с наличием высокометаморфизованных комплексов (гранулитов) и вулканических серий основного состава. Во всех случаях эти высокоскоростные образования не прослеживаются на значительную глубину, а подстилаются более низкоскоростным комплексом пород.

Согласно результатам бурения скв. СГ-3,

с глубиной не происходит изменения скорости распространения упругих волн, стирания дифференциации физических свойств под влиянием литостатического давления и других факторов. Эти свойства могут как возрастать, так и уменьшаться с глубиной, в частности в связи с появлением зон трещиноватости, насыщенных флюидами. Как следует из распределения скорости распространения упругих волн в вертикальном разрезе скв. СГ-3, волноводные структуры представлены чередованием пластов с относительно малой мощностью (сотни метров). Можно полагать, что и латеральная протяженность таких объектов тоже невелика (до первых километров), т. е. внутренняя структура волноводов изменяется в горизонтальном направлении. Таким образом, волноводы — не исключение, а правило для сложных разрезов верхней части консолидированной коры щита.

Подводя итоги проведенным сейсмическим работам в районе скв. СГ-3, можно утверждать, что основные сейсмические границы в верхней части кристаллической коры связаны с изменениями упругих свойств среды, вызванными различием состава пород (литолого-стратиграфические границы), либо с изменением физического состояния пород: раздробленность, дезинтеграция (тектонические границы). На многих профилях регистрируются отраженные волны от границы раздела между древними супракрустальными образованиями архея и вышележащими более поздними породами. Возрастные различия, а следовательно, количество фаз наложенного метаморфизма, многообразие видов складчатости, преобразование состава ведут к изменению физических свойств пород по сравнению с относительно более поздними структурно-вещественными комплексами. Сейсмическая граница между ними обусловлена различием упругих свойств, несогласностью залегания, тектонизацией контакта.

Таким образом, Кольская скважина СГ-3 открыла новую эпоху в изучении континентальной коры. Ее бурение показало, что наши знания даже о верхних слоях земной коры несовершенны. Состав пород на глубине ниже 5 км оказался не таким, какой предполагался по косвенным геофизическим данным, и «раздела Конрада» на предполагаемой глубине не обнаружено. Впервые получены прямые данные о составе и строении древней кристаллической коры до глубины 12 262 м. Установлено наличие рудной минерализации и флюидов вплоть до максимальной глубины скважины, измени-

лись представления о природе геофизических границ.

Скважина Пограничная. Работы, выполненные в 2001 г. предприятием «Спецгеофизика» методом ОГТ на полуостровах Средний и Рыбачий (рис. 5), позволили получить представление о весьма сложном строении верхней части земной коры. Структура сейсмического разреза достаточно четкая до глубины примерно 2,5 км (рис. 6). Здесь отмечается серия динамически выраженных «сильных» отражающих границ. Их реальное существование не могло вызывать никаких сомнений [Шаров и др., 2007]. Эти границы должны были быть зафиксированы в материалах бурения, хотя их положение по глубине могло отличаться от буровых данных на несколько процентов в силу погрешности определения скорости распространения сейсмических волн. Структурный характер сейсмического разреза позволял уверенно говорить о наличии мощного расслоенного осадочного

чехла верхнего протерозоя, по крайней мере, до глубины около 2,5 км. Ниже в разрезе картина становится существенно нерегулярной (неслоистой). Тем не менее предполагалось продолжение рифейских осадочных образований в виде мощных клиноформных образований на склоне щита. Их подошва предполагалась на глубине 8 км, где, возможно, могла находиться поверхность кристаллического фундамента AR—PR₁.

Геологическая интерпретация сейсмических разрезов вряд ли могла быть однозначной в связи с неоднозначностью трактовки стратиграфической последовательности свит и серий терригенных пород рифея, выделенных на полуостровах Средний и Рыбачий, между ними, а также с образованиями сопредельных рифейских структур. Наиболее четко выделена граница на глубине 1500 м вблизи перешейка между п-овами Средний и Рыбачий. В месте положения пробуренной на п-ове Средний скв. Р-1 (Пограничной) эта граница расположена на глубине около 1200 м, т. е. практически точно соответствует границе между рифейскими породами и фундаментом (1100 м), вскрытой скв. Р-1 [Сорохтин и др., 2011].

С глубин 1100—4500 м скважиной вскрыты метаморфические породы (гнейсы, мигматиты, амфиболиты и др.), вероятно, раннего докембрия, с дайками разнотипных долеритов. Такое несоответствие объясняется, скорее всего, ошибкой в определении скоростных параметров и, как следствие, — ошибочной геологической интерпретацией разреза. Конечно, в столь сложнопостроенной среде, каковой является участок земной коры полуостровов Средний и Рыбачий, осуществлять закладку параметрической скважины по профилю, выполненному единственным геофизическим методом ОГТ, было весьма опроретчиво.

На перешейке полуостровов Средний и Рыбачий расположены две параметрические скважины и две поисковые скважины Р-2 (до 800 м) и К-1 (до 1000 м), которые вскрыли на глубинах 790 и 800 м тектонические брекчии с устойчивым долговременным притоком газа (метан, этан) [Сорохтин и др., 2011].

Анализ керна параметрических скважин Пограничная и Рыбачинская, пробуренных до глубин 5200 и 3001 м соответственно, показал, что вариации измеренных значений плотности и намагниченности рифейских и архейских пород по стволу скважины и их гомологов на поверхности соответствуют друг другу (см. таблицу) [Сорохтин и др., 2011].

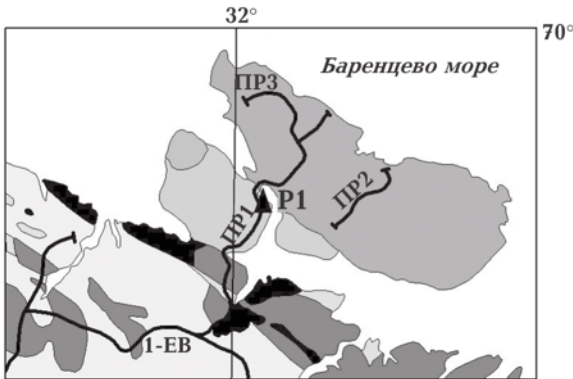


Рис. 5. Изученность северо-запада Кольского полуострова сейсмическими методами ОГТ и положение скважины Пограничной (Р1).

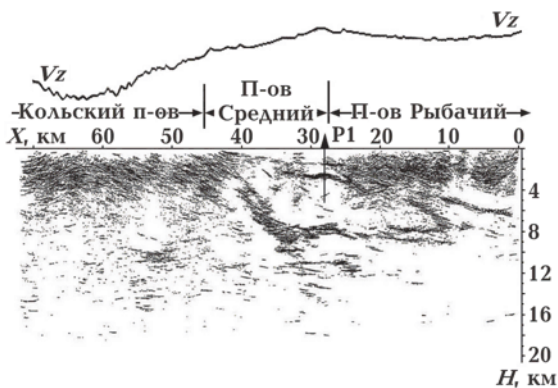


Рис. 6. Глубинный разрез ОГТ и график гравитационного поля по профилю 1 [Шаров и др., 2007].

Средние значения плотности и магнитности пород по данным скв. Пограничная-1

Возраст	Свита, тип пород	Интервал опробования, м	σ , г/см ³	$\chi \times 10^{-3}$, ед. СИ	I_n , А/м
Поздний рифей	Землепахтинская	135—142	2,55	0,15	—
	Палвинская	609—783	2,68	0,39	—
	Пяряярвинская	931—1090	2,70	0,36	—
Архей, протерозой	Плагиограниты	1092—1720	2,69	9,81	0,22
	Долериты	1720—1760	2,94	11,8	1,9
	Плагиосланцы	1760—2090	2,67	1,5	0,01
	Плагиогнейсы	2090—2300	2,68	3,0	0,4
	Биотит-амфиболовые гнейсы	2300—4375	2,77	3,96	0,91
	Амфиболлизированные долериты	4375—4380	3,16	31,0	7,30

На основе петрофизических данных о магнитной восприимчивости рифейских пород (см. таблицу) можно сделать вывод, что источник аномального поля на изученной территории — преимущественно породы архейского фундамента. Качественный анализ и оценка глубинного положения источников региональной компоненты магнитного поля позволяют указать, что верхняя граница намагниченного комплекса фундамента погружается в северо-восточном направлении до глубины 5—6 км на северном побережье п-ова Рыбачий. Таким образом, материалы анализа аномального магнитного поля региона свидетельствуют о принципиальных различиях в структуре кристаллического фундамента полуостровов Средний и Рыбачий. Роль рифейского осадочного чехла в формировании аномального поля (его локальных аномалий), вероятно, весьма незначительна [Сорохтин и др., 2011].

Таким образом, скв. Пограничная прошла вулканогенно-осадочные протерозойские отложения и на глубине 1100 м вскрыла архейские плагиограниты, т. е. границу между рифейскими породами и фундаментом (1100 м). По данным ОГТ выделены две отражающие границы на глубинах 1200 и 2300 м, которые частично подтверждены результатами бурения.

Скважина Гравберг. В 1985 г. проведены сейсмические исследования МОВ по серии профилей в пределах кольцевой гранитной структуры Сильян (Центральная Швеция) и их результаты сопоставлены с данными бурения сверхглубокой скважины Гравберг (6337 м) [Deep Drilling ..., 1988]. Сейсмические профили пересекают эту структуру в меридиональном и широтном направлениях. Наиболее интересный результат проведения сейсмических ис-

следований — установление в разрезе северной части кольцевой структуры Сильян серии субгоризонтальных отражающих горизонтов (рис. 7). Три верхних из них вскрыты скважиной Гравберг. Оказалось, что горизонты связаны с долеритовыми интрузиями мощностью 20 и 60 м и с тонкорасслоенной зоной, мощность отдельных слоев которой 3—9 м. Интрузии проникли в гранитный массив по разломам. Отражающие горизонты обусловлены, таким образом, контактами принципиально разных пород и тектоническими плоскостями.

Скважина Оутокумпу. Заложена в юго-восточной части Финляндии около отработанного полиметаллического месторождения. Скважина глубиной 2516 м прошла зону контакта пород архей—протерозой на глубине 1310 м. Сейсмические построения (рис. 8, а) позволили предположить, что основные породы разреза могут быть представлены слюдястыми и черными сланцами. На глубине 1310 м про-

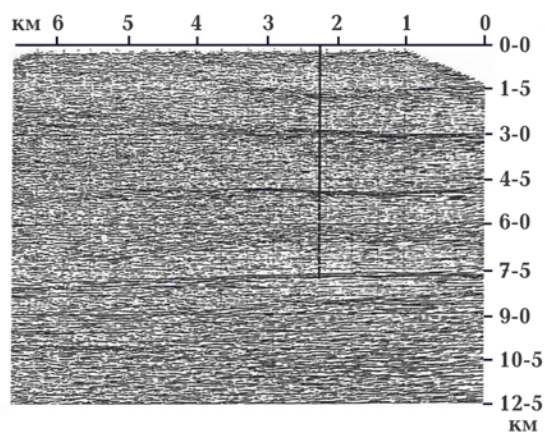


Рис. 7. Сейсмический разрез ОГТ и положение скважины Гравберг [Deep Drilling ..., 1988].

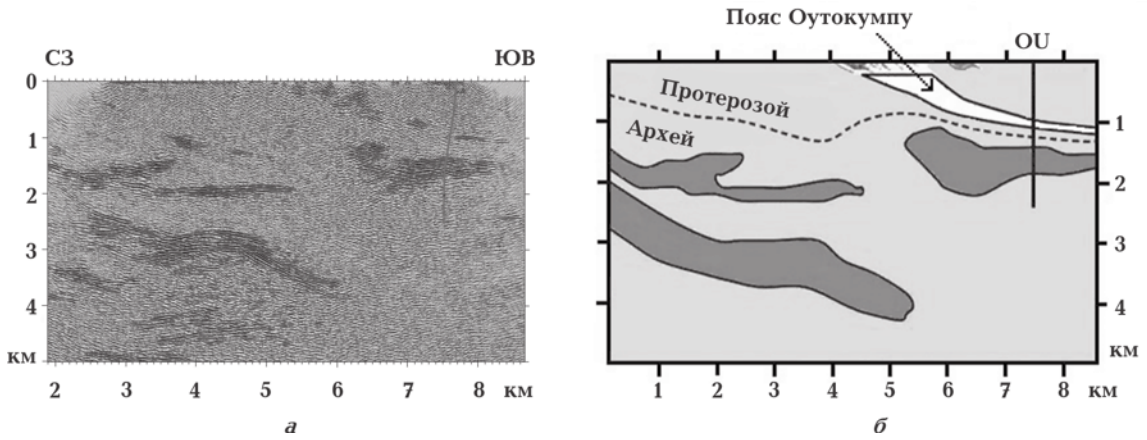


Рис. 8. Мигрированный разрез ОГТ, положение скважины Оутокумпу (а) и геолого-геофизический разрез (б) района бурения скважины OU [Outokumpu, 2011].

ходит граница между породами протерозойского и архейского фундамента. В интервале 1400—1900 м предполагалось наличие метаморфических пород. Реальный разрез показал (рис. 8, б), что в верхней части скважины до глубины 1310 м вскрыты слюдястые сланцы. Интервал 1310—1515 м сложен перемежающимися слоями черных сланцев, биотитовых гнейсов, серпентинитов. В интервале глубин 1655—2516 м слюдястые сланцы перемежаются со слоями биотитовых гнейсов, пегматоидных гранитов.

Онежская параметрическая скважина (ОПС). Вскрыт непрерывный раннедокембрийский разрез мощностью 3537 м, включающий граниты фундамента позднеархейского возраста и главные стратоны ранних карелид, представленные ятулийским, людиковийским и калевийским надгоризонтами. В процессе бурения изучался керн, а также выполнена комплексная интерпретация материалов геофизических исследований скважин (ГИС) и вертикального сейсмического профилирования (ВСП). В интервале 2751—2944 м вскрыта толща каменной соли палеопротерозойского возраста. На рис. 9 показан сейсмотомографический разрез по профилю Сямозеро—Повенецкий залив, который расположен в 17 км к северу от участка бурения ОПС. Основные скоростные характеристики разреза и предложенная прогнозная модель [Шаров и др., 2010] подтверждены результатами бурения ОПС. Однако никто из исследователей не предполагал обнаружить самую древнюю каменную соль в основании Онежской структуры.

С целью обобщения и изучения изменения физических свойств горных пород с глубиной в разрезе ОПС построено несколько геолого-

геофизических моделей — геоэлектрическая, георадиационная, геоплотностная, геомагнитная, геоакустическая [Онежская ..., 2011]. Геолого-геофизические модели для удобства сопоставления построены однотипно. На них даны: стратиграфическая разбивка, интервалы отбора керна, литологическая колонка по данным ГИС с учетом результатов исследований керна и шлама, кривые геофизических параметров и результаты их интерпретации, определения на керне физических свойств пород, тонограмма и геофизическая модель.

Геоэлектрическая модель. Построена по данным измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) методом бокового каротажа (БК), которые сопоставлены с результатами измерений УЭС на керне (рис. 10) [Онежская ..., 2011]. В целом эти данные коррелируются между собой. Имеющиеся расхождения на отдельных интервалах разреза вполне объяснимы. Данные определения УЭС на керне могут отличаться от УЭС пород в естествен-

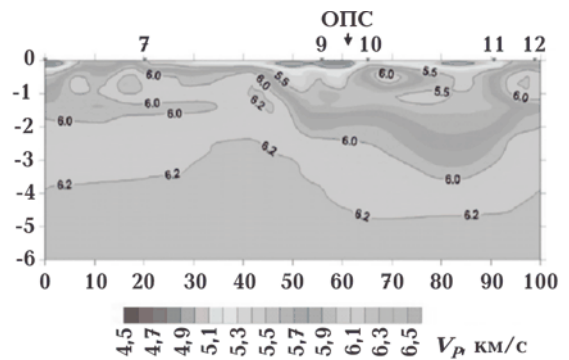


Рис. 9. Сейсмотомографический разрез и положение Онежской параметрической скважины (ОПС).

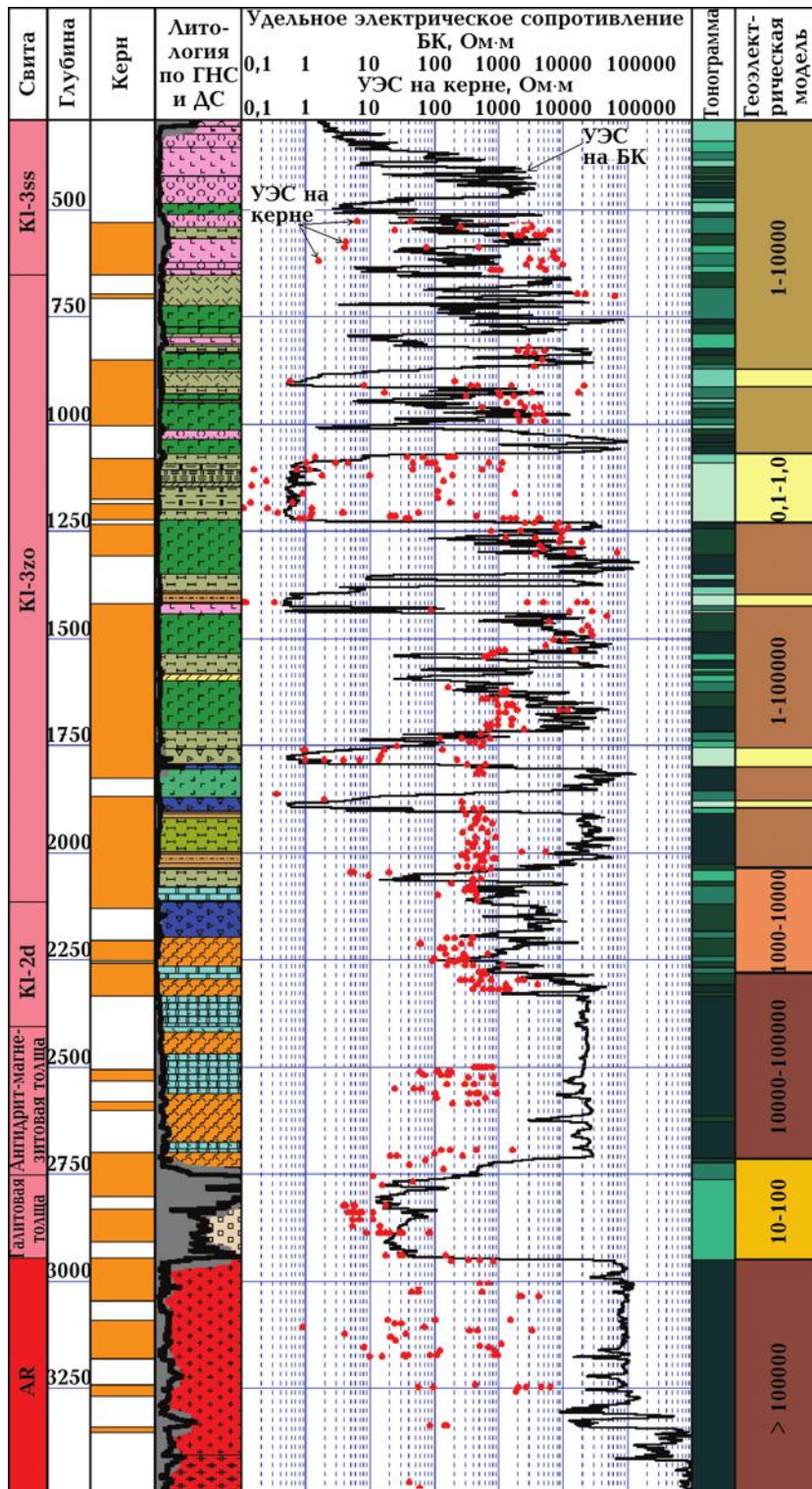


Рис. 10. Геозлектрическая модель ОПС [Онежская ..., 2011].

ном залегании вследствие недонасыщения образцов пород или насыщения их растворами с минерализацией, отличной от фактической. Значения УЭС по данным БК в области

высоких значений (более 40 000 Ом·м) могут быть искажены, так как аппаратура БК имеет определенный рабочий диапазон измерения. Следует также учитывать, что объем породы,

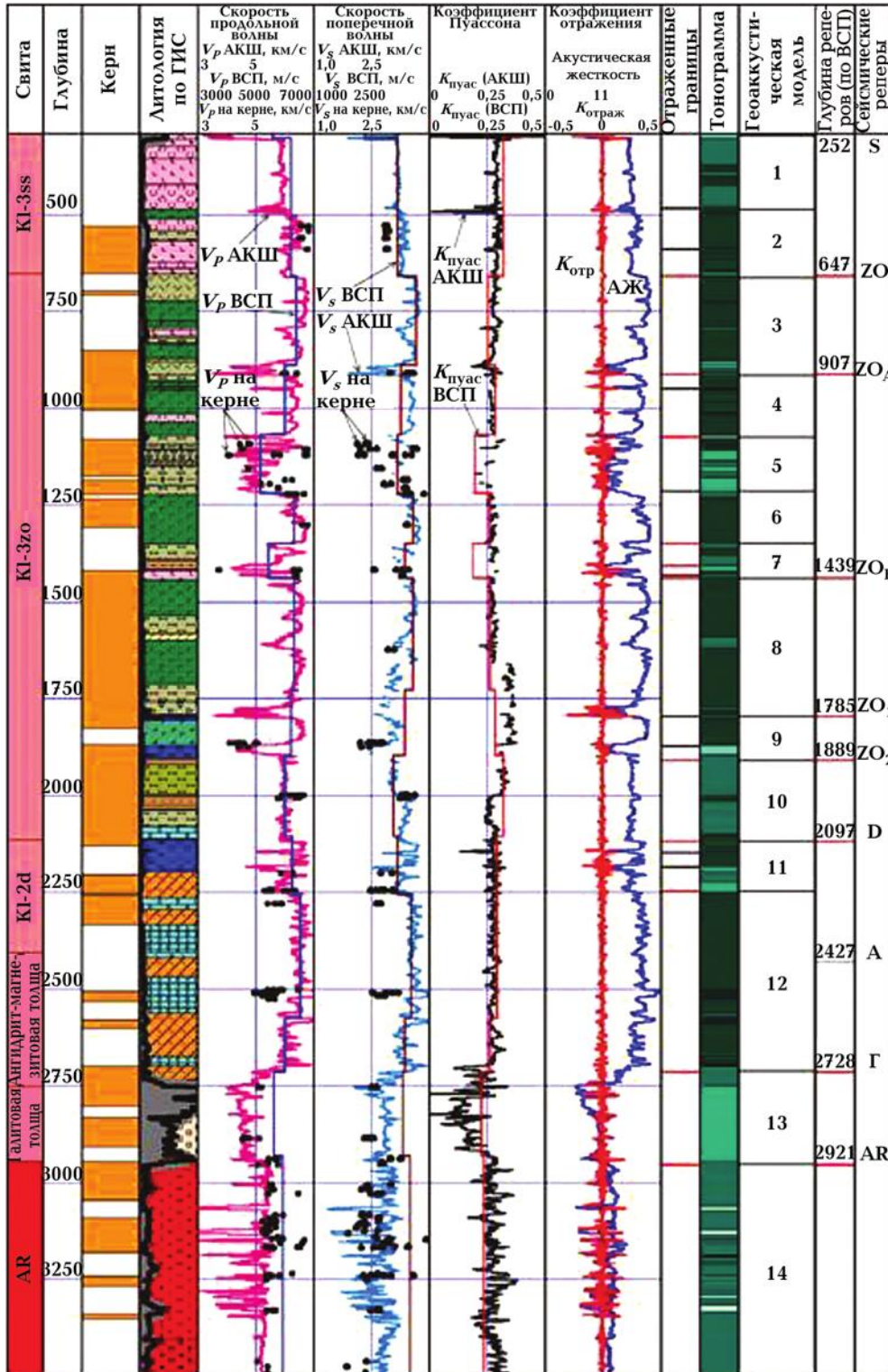


Рис. 11. Геоакустическая модель ОПС [Онежская ..., 2011].

на котором определялось УЭС, различен при измерениях методом БК и на образцах керна (точечное определение).

Тем не менее, несмотря на эти ограничения, разрез четко дифференцируется по

уровню значений УЭС. Наиболее низкими значениями УЭС в разрезе характеризуются интервалы, представленные породами с электронной проводимостью. К таким породам относятся черные углеродистые сланцы и

шунгит-метаморфизованный каменный уголь, — переходная стадия от антрацита к графиту. В результате метаморфизма в условиях сжатия и воздействия на органические осадки высоких температур образуется распыленный в минеральной матрице аморфный углерод, что ведет к возникновению электронной проводимости. В зависимости от концентрации углерода различают следующие разновидности шунгита: блестящая (С +94 %), матово-серая (С +64 %) и др. Другая возможная причина возникновения электронной проводимости в породах — высокое содержание в них рудных минералов. Рассеянная вкрапленность пирита, халькопирита, пирротина достигает 15 % по данным анализа керна, а в отдельных интервалах 30—40 %.

Наиболее высокими значениями проводимости (300—500 м См/м) и низкими — УЭС (<1,0 Ом·м) характеризуются интервалы 876—914, 1070—1226, 1379—1439, 1762—1794, 1867—1903 м. Есть интервалы со значениями УЭС в диапазоне 1—10 Ом·м. Возможно, это связано с вариациями концентраций углерода и рудных минералов в породах, что позволяет классифицировать разрез на породы с высоким, средним и низким содержаниями минералов, обеспечивающих возникновение электронной проводимости.

Другой тип аномалии УЭС обнаружен в интервале 2751—2944 м. По данным БК УЭС составляет 10—100, по данным исследований керна — 4—100 Ом·м. Рассматриваемый интервал представлен каменной солью с прослоями сульфатизированных пород. Понижение УЭС относительно ожидаемых обусловлено искажением показаний БК в интервалах развития каверн диаметром свыше 0,5 м и осолонением высокоминерализованными рассолами пород, залегающих в этой толще. В свою очередь, результаты измерения УЭС на образцах пород, слагающих прослой в соленосной толще, могут быть занижены вследствие насыщения их при лабораторных измерениях высокоминерализованной жидкостью с концентрацией солей выше, чем в естественном залегании.

В надсолевой части разреза диапазон УЭС пород составляет от 100 до 40 000 Ом·м и более. Наиболее высокоомны интрузивные породы: долериты и габбро-долериты (более 40 000 Ом·м). УЭС ангидрит-магнезитов и ангидритов отличается стабильностью по разрезу и составляет в среднем 20 000 Ом·м. В подсолевой части разреза УЭС гранитов и гранито-гнейсов максимальное. Оценить реальные УЭС грани-

тоидов сложно, так как их значения находятся за пределами диапазона измерений используемой аппаратуры.

Геоакустическая модель. При построении геоакустической модели использованы результаты обработки широкополосного акустического каротажа (АКШ), ВСП, а также исследований керна. Сопоставление между собой величин скоростей распространения продольной и поперечной акустических волн, оцененных этими методами, показывает, что в большей части разреза они хорошо коррелируются между собой (рис. 11). Заметное расхождение между данными ВСП и АКШ отмечается ниже глубины 2700 м против галитовой толщи и гранитов архея. Это вызвано как возможным влиянием на АКШ кавернозности ствола скважины в указанной части разреза, так и чередованием интервалов пород, характеризующихся различными коэффициентами отражения упругих волн. Именно в таких частях разреза отмечаются расхождения в значениях V_P и V_S , оцененных двумя различными независимыми методами. Следует также учитывать, что разрешение по глубине данных АКШ выше, чем при ВСП. Результаты определения скоростей на образцах керна в целом хорошо согласуются с данными АКШ [Онежская ..., 2011].

Рассчитанные значения коэффициента Пуассона изменяются по разрезу в реальном диапазоне значений 0,20—0,30. Весь комплекс использованных параметров: V_P , V_S , коэффициент Пуассона, коэффициент отражения, акустическая жесткость ($V_P \delta_{II}$) по данным АКШ, ВСП и исследований керна позволил установить глубины нахождения отражающих границ и построить геоакустическую модель.

Разрез расчленен на 14 толщ по уровню средних значений акустических параметров, характеру строения, с учетом глубин нахождения отражающих границ. Полученные результаты сопоставлены с глубинами залегания сейсмических реперов по результатам комплексного анализа волновых полей ВСП и ГИС. В целом глубины сейсмоотражающих реперов согласуются с построенной геоакустической моделью. Исключение составляет сейсмический репер А, приуроченный к кровле ангидрит-магнезитовой толщи (глубина 2427 м). На данной глубине не отмечается какого-либо значительного изменения акустических или других геофизических параметров, за исключением повышения содержания урана по данным СГК (интервал 2405—2417 м). Отражающие границы приурочены либо к глубинам

скачкообразного изменения акустических параметров и плотности пород, обусловленных сменой петротипа, либо к глубинам развития зон трещиноватости [Онежская ..., 2011].

Вскрытие скважиной соленосной толщи палеопротерозойского возраста — уникальное событие мирового масштаба, которое требует дальнейшего изучения и осмысления как с позиций ее генезиса, так и площадного распространения.

Выводы. При глубинном бурении получены прямые данные о составе и строении верхней части кристаллической коры до глубины 12 км, которые показали, что мы ничего не знаем о

континентальной коре. Эти данные заставили в значительной мере изменить представления, существовавшие раньше. Результаты геофизических исследований при бурении глубоких скважин на Фенноскандинавском щите заставляют исследователей по-другому относиться к интерпретации геолого-геофизических данных. Только результаты бурения глубоких скважин в кристаллической коре позволяют получить сведения о вещественном составе пород и петрофизических характеристиках, что способствует построению объективного геолого-геофизического разреза верхней части земной коры.

Список литературы

- Березовский Н. С., Галдин Н. Е., Кузнецов Ю. И.* Геофизические исследования сверхглубоких скважин (Кольский и Новоелховской) как основа интерпретации геологического строения кристаллического фундамента. — Тверь: АИС, 2006. — 395 с.
- Кольская сверхглубокая.* Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины / Отв. ред. Е. А. Козловский. — Москва: Недра, 1984. — 490 с.
- Кольская сверхглубокая.* Научные результаты и опыт исследований / Отв. ред. В. П. Орлов, Н. П. Лавров. — Москва: МФ «ТЕХНОНЕФТЕГАЗ», 1998. — 260 с.
- Криворожская сверхглубокая скважина СГ-8* / Под ред. Е. М. Шеремета. — Донецк: Ноулидж, 2011. — 555 с.
- Литвиненко И. В.* Сейсмический метод при изучении глубинного строения Балтийского щита // Зап. ЛГИ. — 1963. — 46, вып. 2. — С. 3—13.
- Онежская палеопротерозойская структура* (геология, тектоника, глубинное строение и минералогия) / Отв. ред. Л. В. Глушанин, Н. В. Шаров, В. В. Щипцов. — Петрозаводск: КНЦ РАН, 2011. — 431 с.
- Проблемы комплексной интерпретации геолого-геофизических данных* / Отв. ред. В. А. Глебовицкий, Н. В. Шаров. — Ленинград: Наука, 1991. — 224 с.
- Сорохтин Н. О., Козлов Н. Е., Куликов Н. В., Глазнев В. Н., Чикирев И. В.* Эволюция северо-западной части Тимано-Варангерского нефтегазоносного бассейна // Вестник КНЦ РАН. — 2011. — 3, № 6. — С. 3—20.
- Сейсмогеологическая модель литосферы Северной Европы: Лапландско-Печенгский район* / Отв. ред. Н. В. Шаров. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1997. — 226 с.
- Федунский В. В., Ризниченко Ю. В.* Изучение земной коры // Вестник АН СССР. — 1962. — № 6. — С. 86—89.
- Шаров Н. В., Исанина Э. В., Пожиленко В. И., Стулак В. М.* Повышение достоверности геологических моделей земной коры района полуостровов Средний—Рыбачий на основе комплексирования сейсмических методов ОГТ, ГСЗ, МРС // Урал. геофиз. вестник. — 2007. — № 4. — С. 98—105.
- Шаров Н. В., Клабуков Б. Н., Рычанчик Д. А.* Геолого-геофизическая модель строения земной коры Онежской структуры // Геофиз. журн. — 2010. — 30, № 3. — С. 132—139.
- Шаров Н. В.* Литосфера Балтийского щита по сейсмическим данным. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1993. — 145 с.
- Deep Drilling in Crystalline Bedrock. Vol. 1: The Deep Gas Drilling in the Siljan Impact Structure, Sweden and Astroblemes* / Eds A. Boden, K. G. Eriksson. — Berlin Heidelberg: Springer—Verlag, 1988. — 364 p.
- Koistinen T., Stephens M. B., Bogachev V., Nordgulen O., Wennerström M., Korhonen J.* Geological map of the Fennoscandian Shield, scale 1:2 000 000. — Geol. Survey of Finland, Norway and Sweden and North-West Department of Natural Resources of Russia, 2001.
- Otokumpu Deep Drilling Project 2003—2010.* Geological Survey of Finland / Ed. I. T. Kukkonen. — Espoo, 2011. — Spec. Pap. 51. — 252 p.