

На правах рукописи

Цыдыпова Лариса Ринчиновна

**ТРЕХМЕРНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ,
ВОССТАНОВЛЕННЫЕ ПО ГОДОГРАФАМ ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН
(БЕЛОЕ МОРЕ, НОРИЛЬСКИЙ РЕГИОН) И РАЗРЕЗ ПО ПРОФИЛЮ
ФЕННОЛОРА С УЧЕТОМ КРИВИЗНЫ ЗЕМЛИ**

Специальность 25.00.10 Геофизика, геофизические методы поисков полезных
ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: Доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий научный сотрудник.
Пийп Валентина Борисовна

Официальные
оппоненты: Шаров Николай Владимирович
Доктор геолого-минералогических наук, профессор.
Институт геологии Карельского научного центра
РАН

Устинова Вера Николаевна
Доктор геолого-минералогических наук, профессор.
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Геологический институт
Российской академии наук (ГИН РАН)

Защита диссертации состоится 19 декабря 2012 года в 14 часов 30 минут на заседании Диссертационного совета Д.501.001.64 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д.1, ГЗ МГУ, зона «А», Геологический факультет, аудитория 308.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале отдела диссертаций Фундаментальной библиотеки (Ломоносовский проспект, 27, сектор А, 8 этаж, к. 812)

Автореферат разослан 16 ноября 2012 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Никулин Борис Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В начале 60-х годов проверка результатов интерпретации данных корреляционного метода преломленных волн (КМПВ) бурением показала значительные ошибки в определении глубин горизонтов (фундамента, в частности) на Русской платформе. Интерпретационной моделью тогда являлась слоисто-однородная среда с постоянными скоростями в слоях и резкими практически субгоризонтальными – слабо криволинейными границами раздела 1-го рода. Доверие к этому методу снизилось, и мир перешел к сейсмическим измерениям методом отраженных волн – методу общей глубинной точки, где тоже имеются значительные проблемы, в частности, при определении скоростей, а значит и глубин. При исследованиях методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), который в основном основан на регистрации преломленных волн, интерпретация стала проводиться методом моделирования, т. е. методом подбора решений прямой задачи. Решение обратной задачи при работах методом преломленных волн в настоящее время практически не используется.

Способ однородных функций дает автоматическое устойчивое решение обратных задач метода преломленных волн для моделей среды с горизонтальным и вертикальным градиентом скорости с произвольными границами раздела и волноводами, т.е. для самых общих моделей сейсмических сред.

В диссертации доказывается, что применение модели среды с однородной функцией скорости возрождает метод преломленных волн в его классическом варианте. Это показывается в случае интерпретации современных исследований МПВ в Белом море, переинтерпретации данных КМПВ прошлых лет в Норильском регионе и на примере сверх глубоких исследований мантии на Скандинавском полуострове. Во всех случаях новая интерпретация позволила дать существенно новые сведения о геологическом строении регионов и получить весьма детальные трехмерные образы исследуемых сред. Установлены мощности земной коры, скоростные параметры, волноводы, области с повышенными скоростями, переходная зона кора – мантия, глубинные разломы и другие структуры.

Достоверность исследований подтверждается хорошим совпадением скоростных кривых в точках пересечения профилей, разрезы по которым вычислены автоматически и независимо друг от друга.

Актуальность проблемы

- Определение возможностей метода однородных функций в условиях детальных площадных работ является актуальной проблемой в связи с новой интерпретацией данных метода преломленных волн;
- Белое море – это одно из внутренних морей России. Его структуры взаимосвязаны с прилегающей к нему сушей. Интерес последних лет к региону Белого моря связан с возможной нефтегазоносностью его прогибов.

- Обработка и переинтерпретация сейсмических данных прошлых лет – экономически обоснованное решение, которое дает дополнительную информацию о геологическом строении региона. Вследствие этого, возможность получения новой информации посредством переобработки и переинтерпретации сейсмических данных прошлых лет на основе двухмерно-неоднородной модели среды в Норильском регионе, без привлечения дорогостоящих региональных геофизических работ также весьма актуальна;

- Изучение глубинного строения Балтийского щита имеет решающее значение для понимания и исследования проблем эволюции земной континентальной коры и, в особенности, ее европейской части. Впервые на сейсмическом разрезе в районе Балтийского щита на глубинном профиле ФЕННОЛОРА автоматически прослежен в астеносфере непрерывный мощный высокоскоростной и высокоградиентный слой, погружающийся к северу.

Цель работы

1. Изучение сложной, неоднородной литосферы в Балтийском регионе и строения коры в районе Норильска по данным метода преломленных волн;

2. Определение возможности метода однородных функций в условиях очень детальных площадных сейсмических исследований, а также для построения разрезов по данным сверхдлинных сейсмических профилей.

Основные задачи исследования:

1. Выбор оптимального графа обработки годографов волн путем перебора параметров (интервалы интерполяции в отношении приемников и источников, размер сетки поля скорости при построении разрезов);

2. Автоматическое построение сейсмических разрезов и горизонтальных карт-срезов с использованием возможностей метода однородных функций;

3. Трехмерная геологическая интерпретация полученных разрезов и горизонтальных карт-срезов;

4. Сравнение полученных разрезов с разрезами по данным предыдущих исследований;

5. Выявление и обоснование ранее неизвестных глубинных структур регионов, полученных по результатам исследований;

6. Обоснование достоверности разрезов.

Научная новизна исследований

1. Впервые по годографам преломленных волн автоматически в центральной части Белого моря, в осадочном слое и верхней коре выявлена четко выраженная впадина (провал), ограниченная разломами, размерами по горизонтали 150x100 км и глубиной до 12 км с низким градиентом скорости.

2. Впервые в Норильском регионе автоматически построены разрезы и карты-срезы, на которых получено изображение выступа фундамента сложной формы размерами 250x150 км и высотой до 5 км. Его облекают рифейские и более молодые

осадочные отложения, имеющие относительно спокойные формы. Свод фундамента осложнен разломами и поднятиями, также существуют крупные надвиговые и складчатые структуры. В центральных частях области исследования прослеживается на картах-срезах цепь до четырех небольших провалов на глубинах от 3 до 6 км, положение которых изменяется с глубиной разрезов.

3. Впервые на сейсмическом разрезе в районе Балтийского щита на глубинном профиле ФЕННОЛОРА автоматически прослежен в астеносфере непрерывный мощный высокоскоростной и высокоградиентный слой, погружающийся к северу.

Практическая ценность работы и личный вклад автора

Обработка, построения и сравнительный анализ сейсмических данных, а также их геологическая интерпретация и геологические обобщения выполнены автором лично.

Практическая ценность работы заключается в исследовании возможностей метода однородных функций при интерпретации плотной системы годографов и значительного количества профилей в условиях сложно-построенного шельфа северных морей России и для получения новой информации о глубинном строении Норильского региона. Также материалы данного исследования могут быть использованы для оценки перспектив нефтегазоносности регионов и при создании моделей геологической и тектонической эволюции литосферы морей Севера России и структур Норильского никеленосного региона перспективного в отношении месторождений полиметаллов.

Защищаемые положения

В диссертации содержится нестандартное решение проблемы геологического строения региона Белого моря и Норильского региона, а также сверхглубинных исследований в районе Скандинавского полуострова, имеющие практическое значение. Работа обосновывает следующие научные положения, защищаемые автором:

1. Использование модели среды с однородной функцией скорости возрождает метод преломленных волн в сейсморазведке во всех его модификациях;

2. В центральной части осадочного слоя и верхней коры Белого моря в районе Керецкого грабена существует провал сложной формы до глубины 12 км. Установлены положение и размеры вглубь этого провала;

3. Переинтерпретация данных площадных работ КМПВ в Норильском регионе существенно уточнила трехмерную форму и размеры поднятия фундамента, облеченного осадочными слоями;

4. В астеносфере на Балтийском щите по профилю ФЕННОЛОРА прослежен непрерывный мощный высокоскоростной и высокоградиентный слой, погружающийся к северу.

Фактический материал. В качестве исходных материалов для получения сейсмических разрезов были использованы сейсмические площадные наблюдения:

- по 3 профилям МПВ в акватории Белого моря общей длиной более 500 км, предоставленные ОАО «Морской арктической геологоразведочной экспедицией»;
- по 8 региональным профилям КМПВ в Норильском районе общей длиной 3000 км, предоставленные Норильским горно-металлургическим комбинатом;
- по сверхдлинному профилю ГСЗ «ФЕННОЛОРА» длиной 2000 км по данным открытой публикации «Литосфера Балтийского щита по сейсмическим данным» Шарова Н.В., Апатиты, 1993.

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертации доложены и обсуждались на российских и международных научно-практических геолого-геофизических конференциях в Москве 2007, 2009, 2011; Тюмени 2009 и в Копенгагене 2012. Результаты проведенных исследований опубликованы в 3 статьях Вестника Московского университета. Серия 4. Геология.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав и заключения, представлена на 199 страницах, включая 93 рисунка и список литературы из 208 наименований.

Благодарности

Особую глубокую признательность и искреннюю благодарность автор выражает своему научному руководителю доктору геолого-минералогических наук, профессору, ведущему научному сотруднику В.Б. Пийп за помощь, внимание, ценные советы и мудрое руководство в течение последних 6 лет.

Работа выполнена на кафедре сейсмологии и геоакустики Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, всему коллективу которой и заведующему кафедрой, доктору физико-математических наук, профессору М.Л. Владову автор выражает искреннюю благодарность за возможность учиться и проводить исследования в Московском университете. Автор признателен кандидатам геолого-минералогических наук Старовойтову А.В. и Ермакову А.П. за консультации и ценные замечания при выполнении работы.

Автор выражает особую благодарность ОАО «Морской арктической геологоразведочной экспедиции» (МАГЭ) за предоставленные сейсмические материалы по профилям М-2, М-4, М-5 в Белом море и доктору физико-математических наук, профессору кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ В.Р. Мелихову за предоставленные сейсмические материалы по Норильскому региону.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** раскрывается актуальность и значимость диссертационной работы, обозначена цель и сформулированы основные задачи, представлены основные научные результаты, практическая ценность и научная новизна исследования, приведены объем и структура работы.

Глава 1. Метод однородных функций и программа «ГОДОГРАФ»

В главе описывается метод однородных функций (МОФ), с помощью которого проводилась обработка и интерпретация сейсмических годографов преломленных волн. Данный инверсионный метод основан на локальной аппроксимации реальных сред однородными функциями двух координат [Пийп, 1991; Piip, 2001].

МОФ – метод автоматической интерпретации самых сложных данных в исследованиях двухмерно-неоднородных сред, для применения этого метода обращения не требуется никакой начальной модели. Разрезы по всем профилям вычисляются независимо, поэтому сравнение скоростных кривых в точках пересечения профилей дает представление о точности определения скоростей.

Компьютерный пакет программ «ГОДОГРАФ» реализует возможности МОФ. Это универсальная программа для интерпретации любых систем годографов преломленных волн - от крайнего случая двух встречных годографов до случая, где приемники и источники располагаются по профилю с постоянным шагом. Наблюденные оцифрованные годографы в программе аппроксимируются годографами, отвечающие некоторой однородной функции по принципу минимального среднеквадратического отклонения. Далее при решении обратной задачи вычисляется множество сейсмических лучей для каждой пары ПВ. Для системы наблюдаемых годографов, содержащей несколько пар встречных и нагоняющих годографов, скоростной разрез получается путем объединения на одном разрезе нескольких локальных полей скорости, вычисленных для каждой пары встречных годографов.

Программа позволяет получать скоростные разрезы, горизонтальные глубинные карты-срезы, криволинейные поверхности (например, рельеф границ раздела), разрезы распределения физических параметров. Геологическая интерпретация готовых скоростных разрезов и глубинных карт-срезов проводится непосредственно интерпретатором.

Глава 2. Исследования в Белом море

В главе представлен геолого-геофизический обзор Беломорского региона, описана методика и аппаратура сейсмических работ, проведенных «Морской арктической геологоразведочной экспедицией» в 2007 году; приведены сейсмогеологическая интерпретация полученных автором сейсмических разрезов и глубинных карт-срезов и карта рельефа поверхности кристаллического фундамента. Сформулированы основные выводы по главе.

2.1 Особенности геологического строения исследуемого района

Представлены обзор сведений о тектоническом строении акватории Белого моря, о геологическом развитии и времени заложения Беломорской впадины, описана стратиграфия и представлен обзор геолого-геофизических исследований региона.

В первом параграфе приведены основные сведения о Беломорском регионе, его геологическом строении и истории развития основных тектонических структур, а также взгляды некоторых исследователей на природу рифтогенных прогибов.

Часть исследователей рассматривает данный регион как область развития континентального рифтогенеза в рифее, который предшествовал началу общего прогибания и формирования осадочного чехла Мезенской синеклизы и Тимано-Печорского бассейна. В пределах моря по Зандеру [1974] выделяются авлакогенные структуры: Онежско-Кандалакшский авлакоген, в котором глубина залегания фундамента достигает 3000 м в устье Кандалакшского залива; Лешуконский авлакоген и Нижне-Мезенский прогиб. Отрицательные структуры разделены поднятиями кристаллического фундамента – Кулойским выступом и Архангельским горстом.

А.С. Балувев [Балуев, 2006, Журавлев и др., 2007] субпараллельные палеорифтовые зоны северо-западного простирания (Онежско-Кандалакшская, Керецко-Пинежская, Лешуконская и Баренцевоморская) рассматривает «как единый структурно-парагенетический ансамбль, сформировавшийся в условиях горизонтального растяжения края континентальной плиты в среднем – позднем рифее при распаде древнего суперконтинента Палеопангеи». В рельефе кристаллического фундамента выделяемая система палеорифтовых структур, погружающихся от Белого моря к юго-востоку под чехол Мезенской синеклизы, объединяется им в единую рифтовую систему Белого моря (РСБМ) [Балуев, 2006]. РСБМ заложилась в среднем рифее, пережила активизацию во время широкого развития щелочного магматизма в среднем палеозое и в конце кайнозоя во время образования современного бассейна Белого моря. Согласно последним сейсмическим исследованиям МОВ ОГТ в Кандалакшском грабене глубина погружения кристаллического фундамента достигает 8 км [Журавлев, 2007].

Второй параграф посвящен стратиграфии. Кристаллический фундамент Белого моря представлен беломорской серией раннеархейского возраста. Он выходит на дочетвертичную поверхность в западной части вдоль Поморского и Карельского берегов. На восток, в область распространения рифейских отложений вдаётся выступ архейских пород в устьевой части Кандалакшского залива. Отдельные выходы обнаруживаются также вдоль Терского берега в Горле. Поверхность кристаллического фундамента, преимущественно выровненная [Девдариани, 1985].

Осадочный чехол начинается с терригенных отложений рифея, главным полем распространения, которых является устьевая часть Кандалакшского залива и северная, большая часть Бассейна. Отдельные выходы рифейских пород обнаружены

у Терского берега и в Горле. Рифейские грабены перекрываются непосредственно четвертичными отложениями. Вендские отложения окаймляют Онежский полуостров в виде полосы, включающей Соловецкие острова, слагают Двинской залив и протягиваются в Горло вдоль Зимнего берега. Видимая мощность отложений превышает 200 м.

В третьем параграфе дается обзор геолого-геофизических исследований Белого моря. С 60-х годов прошлого века на Белом море начинают применяться геофизические методы исследований, в первую очередь аэромагнитные и гравиметрические [Гафаров, 1963; Зандер, 1967]. На их основе впервые были выделены структуры Онежского и Керецкого грабена, Нижне-Мезенского прогиба и Пялицкого массива. С 1971 г. по инициативе ВСЕГЕИ в Белом море впервые начал применяться комплекс геолого-геофизических методов: подводные фото- и телесъемка, гравиметрическая, магнитометрическая, электрометрическая и радиометрическая съемки, непрерывное сейсмоакустическое профилирование [Алявдин и др., 1973; Мануйлов и др., 1977; Девдариани, 1985]. Независимо и в небольшом объеме были проведены работы сейсмоакустическими методами ПГО «СЕВМОРГЕО» [Гуревич, Яковлева, 1976]. В 1977 г. Константиновским А.А. составлена по геолого-геофизическим данным тектоническая схема северной части Восточно-Европейской платформы. Впервые была дана детальная характеристика строения Онежско-Кандалакшского грабена. С 1980 г. на акватории Белого моря ведутся геолого-съёмочные работы научно-производственным объединением «Архангельскспецгеология». В 1982 г. Гуревичем В.И. с соавторами были рассмотрены возможности применения космических снимков для изучения геологического строения Белого моря. Выделены зоны разломов в Двинском заливе.

В последние годы ОАО «Морской арктической геологоразведочной экспедицией» (МАГЭ) и другими сотрудничающими с ним научными организациями был проведен ряд комплексных геофизических работ (2003-2004, 2007). На их основе были созданы Государственная геологическая карта третьего поколения масштаба 1:1000000 (Госгеолкарта-1000/3), Тектоническая карта Белого моря и прилегающих территорий масштаба 1:1500000 [Балуев и др., 2008].

2.2 Геофизические исследования на Белом море в 2007 году

Профили М-2, М-4 и М-5 были отработаны ОАО «МАГЭ» на судне «Геофизик» в 2007 году методом преломленных волн. Прием и регистрация сигналов осуществлялись с использованием автономных донных сейсмических станций аппаратного комплекса Гном-07 (ФГУП «Техморгео»), которые устанавливались вдоль профилей с интервалом 8-10 км. Возбуждение упругих колебаний производилось пневмоисточниками типа ППИ-М в количестве двух штук, через интервал времени равный двум минутам. Это соответствует расстоянию 250 метров при средней скорости судна 4 узла [Отчет..., 2007].

2.3 Результаты интерпретации данных на Белом море методом однородных функций

В подразделе проиллюстрированы принципы выбора параметров интерполяции годографов при построении разрезов, приведенных в диссертации, на примере профиля М-2 в Белом море; дана геологическая интерпретация полученных автором сейсмических разрезов в пределах акватории Белого моря. Приведены результаты предыдущих исследований в Белом море по профилю АР-3, выполненных Куницыным А.В. [2008]; сделаны выводы о глубинном строении Беломорской впадины.

Изучено глубинное строение Белого моря по профилям МПВ М-2, М-4, М-5. На этих профилях получена достаточная система наблюдений. В соответствии с этим, разрезы являются достаточно детальными и сложными. Среди них самым протяженным и глубинным является профиль юго-восточного направления М-2 длиной 240 км (рис. 1А). Он начинается у Кандалакшского залива, проходит по самой глубокой части Белого моря вдоль Кандалакшского грабена и заканчивается в Двинском заливе вблизи г. Архангельск. Полученный автоматически разрез по профилю М-2 достигает глубин 20 км.

На примере этого профиля (рис. 1А) можно проиллюстрировать принципы выделения слоев. На всех профилях в Белом море выделены 3 слоя - осадки, верхняя кора и средняя кора. Каждый слой характеризуется некоторым выдержанным интервалом скоростей. Осадочный слой 3-6.4 км/с; верхняя консолидированная кора (фундамент) – от 6 до 7 км/с, средняя кора - 6.4 до 8 км/с. Градиенты скорости в каждом слое характеризуются некоторыми преобладающими значениями. Градиент скорости в осадочном слое имеет повышенные значения. Слои разделены непрерывными инверсионными границами раздела, когда скорость вблизи границы в верхнем слое больше, чем в нижнем. Разломы в каждом слое образуют автономную систему и не пересекают границ раздела [Пийп, Цыдыпова, Шалаева, Теплякова, 2011].

Осадочный слой в районе **профиля М-2** характеризуется резко переменной мощностью и колеблется в пределах от 2 (пикет 200 км) до 7.5 км (пикеты 30 и 120 км). В юго-восточной части профиля со стороны Двинского залива наблюдается ступень фундамента. По-видимому, это проявляются структуры Архангельского выступа. Это мощная область с низким градиентом и скоростями 6-6.2 км/с, которая опускается от глубины 2 км под осадочный слой на восток до глубины 5 км. В остальной части профиля осадки погружены на глубину в среднем 6-7 км, которые заполняют Кандалакшский грабен, наиболее четко проявляющийся в кровле фундаменте. Эта структура имеет предположительно складчато-надвиговое строение. На юго-восточном окончании профиля проявляются структуры Унского грабена. *Верхняя кора* (фундамент, 6.2-7 км/с) прослеживается на глубине от 3 до 11 км. Вдоль профиля *средняя кора* (6.4-7.8 км/с) выделяется четко и имеет упорядоченное

строение. Слой представляет собой чередование блоков шириной от 10 до 30 км, падающих на северо-запад под углом 30° . Блоки разделены литрическими разломами, имеющими общее окончание на глубине от 15 до 20 км. Максимальная видимая мощность консолидированной коры составляет 14 км.

Профиль М-4 параллелен профилю М-2, проходит северо-восточнее примерно на 50 км. Профиль длиной 130 км лежит в бассейне Белого моря, пересекает Керецкий грабен по его оси. Полученный автоматически разрез по профилю достигает 16 км глубины. На разрезе в его верхнем *осадочном слое* (3-6.6 км/с) четко выделяется чередование горстов и грабенов (структуры Керецкого грабена), глубина прослеживания которых достигает 6 км. На северо-западе профиля до пикета 70 км наблюдается ступень фундамента, которая возможно характеризует структуры Варзугской моноклинали. *Верхняя кора* (фундамент, 6.2-7.2 км/с) характеризуется переменной мощностью и прослеживается на глубине от 3 до 6.5 км. В центральной части профиля наблюдается крупный провал до глубины 12 км с пониженной на 0.2 км/с скоростью и низким градиентом скорости, протягивающийся на всю мощность верхней коры. Поведение разломов свидетельствует о наличии надвигов или покровов в верхней коре. *Средняя кора* (6.8-7.6 км/с) на этом профиле видна только на очень ограниченном пространстве (на пикетах 60-125 км). Она характеризуется пониженными значениями градиента скорости и падением изолиний на северо-запад. Максимальная видимая мощность консолидированной коры составляет 10 км.

Профиль М-5 длиной 130 км проходит в северо-восточном направлении в центральной части Белого моря. Он пересекает профили М-2 и М-4. Полученный автоматически разрез достигает глубин 15 км. Система наблюдения была дополнена двумя синтетическими годографами, так как годографы из двух крайних станций не имели встречных годографов. Источники дополненных годографов располагаются на пикетах 2 км и 130 км. *Осадочный слой* (4.4-6 км/с) характеризуется средним градиентом скорости. По профилю слой достигает в среднем глубин 4-5 км. На пикетах 30-70 км проявляются структуры Архангельского выступа. Высокоскоростные слои (до 6.4-6.8 км/с) мощностью 2-3 км в кровле *верхней коры* надвинуты друг на друга в северо-восточном направлении. Между пластинами-надвигами залегают относительно низкоскоростные слои (6-6.2 км/с, Керецкий грабен). Глубина грабена составляет 10 км. Мощность верхней коры (6-6.2 – 7-7.4 км/с) переменна по профилю и составляет 3 - 7 км. Разломы свидетельствуют об обстановке сжатия. *Средняя кора* (6.6-7.2 км/с) на профиле расположена на глубине 8-12 км. Структуры Керецкого грабена имеют отражение в кровле средней коры, примерно повторяющей формы вышележащей впадины в кровле верхней коры. Видимая мощность 5 км. Слои падают на северо-восток.

2.4 Горизонтальные скоростные карты-срезы

В подразделе представлены построенные по сейсмическим разрезам М-2, М-4, М-5 горизонтальные скоростные карты-срезы на различных уровнях. При построении карт был включен профиль 3-АР («Севморгео»), обработка и интерпретация которого была выполнена Куницыным А.В. [2008]. На основе сети из 4 профилей МПВ были рассчитаны горизонтальные скоростные карты-срезы в акватории Белого моря на глубинах 3, 7 и 11 км. При выборе глубин автор ориентировался на наглядность и наибольшую информативность получаемых карт-срезов. Уровень 3 км характеризует структуры, лежащие в осадочном слое, 7 км – в верхней коре, 11 км – в кровле средней коры.

На карте-срезе на глубине 3 км наиболее полно проявляются структуры рифтовой системы Белого моря (рис. 1Б). В центральной части среза наблюдается грабен – блок с пониженной скоростью. Вокруг провала наблюдается ступень, ограниченная с трех сторон резким подъемом. На юго-востоке между профилями М-2 и М-4 проявляются структуры Архангельского выступа с высокоскоростными 6-6.4 км/с отложениями. На севере у Терского берега полукругом на глубине 3 км в осадочном слое выходят породы Терской ступени (6.2-6.4 км/с). К юго-западу соседствует выступ – Варзугская моноклинали (6-6.4 км/с). На глубинной карте-срезе выделяется юго-западное направление структур моноклинали, которое согласуется с авторами книги «Тектоника Белого моря и прилегающих территорий» [2012]. Отмечается, что моноклинали состоит из терригенных образований терской свиты среднего рифея и что структуры выступа по ступенчатым сбросам погружаются на юго-запад. Вдоль профиля М-2 на карте-срезе проходит Кандалакшский грабен. Видно понижение структур со скоростями сейсмических волн 5.8-5.2 км/с. Это проявляется северо-восточный борт грабена. На юго-западной части согласно «Тектонике...» [2012] лежит крутой борт с амплитудой сброса до 8 км, выполаживающийся с глубиной. Он проходит за пределами построенной карты-среза. Структуры Керецкого грабена лежат вдоль профиля М-4 (5.8-5.4 км/с), начинаясь Варзугской моноклиналию, переходят в Пинежский грабен, образуя с ним Керецко-пинежский палеорифт. Здесь палеорифт разделяется с Онежско-Кандалакшским палеорифтом Архангельским выступом.

На карте-срезе 7 км прослеживаются отложения со средними скоростями 6.2-6.4 км/с. Скорости уменьшаются при приближении к центру среза, на краевых частях карты в основном прослеживаются высокие скорости 6.6-6.8 км/с. На юго-востоке между профилями М-2 и М-4, так же как и на глубине 3 км, прослеживается структура Архангельского выступа со скоростями 6.6 км/с в центральной части. Далее по часовой стрелке вдоль профиля М-2 прослеживаются структуры Кандалакшского грабена. Здесь уже проявляется крутой юго-западный борт со скоростями 6.8-6.4 км/с и менее пологий со скоростями 6.4-6.2 км/с. Идя дальше на

север можно увидеть относительно высокоскоростные породы 6.6-6.8 км/с Варзугской моноклинали, которые переходят в структуры Терской ступени.

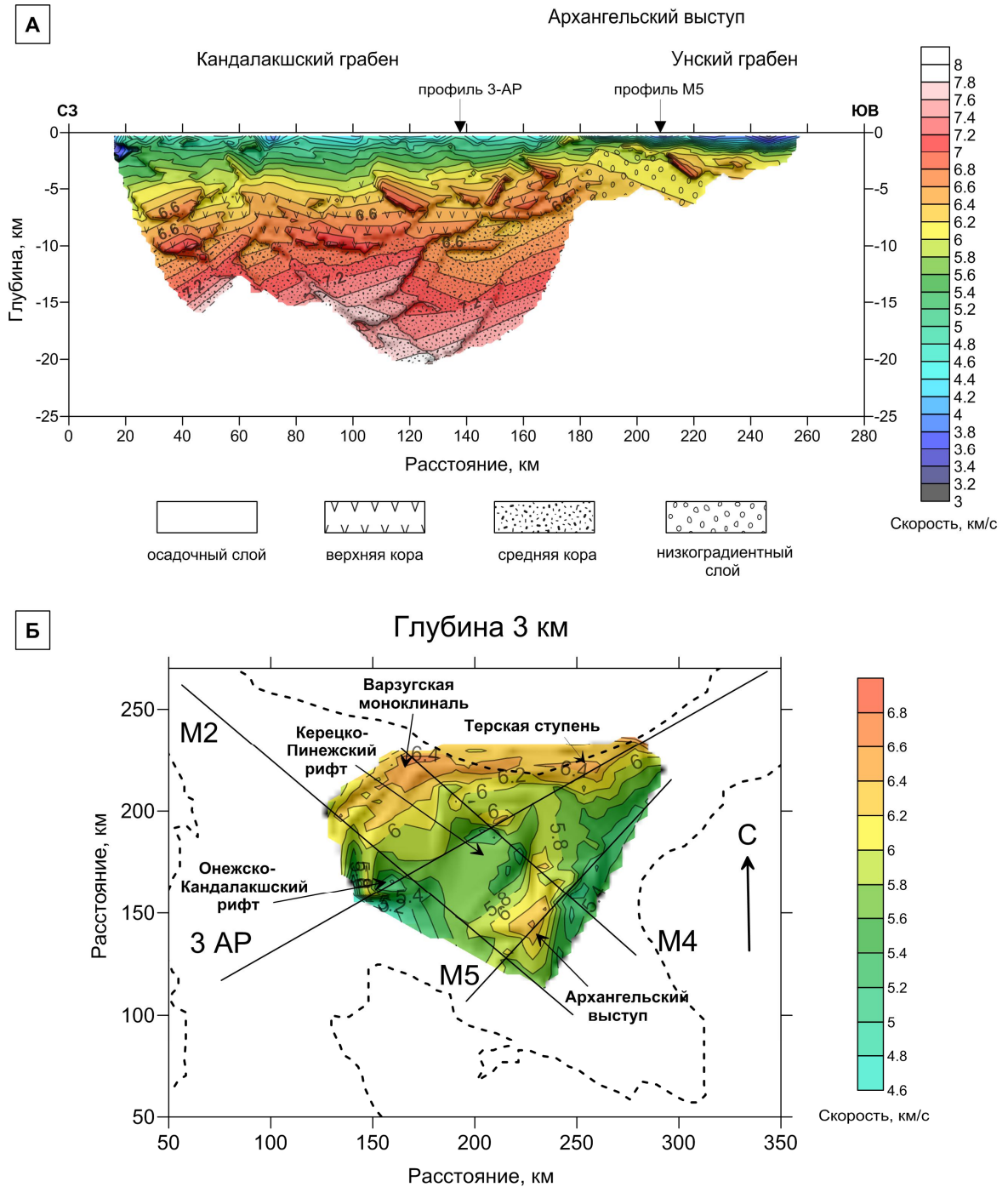


Рис. 1 А - структурный сейсмический разрез с геологической интерпретацией по профилю М-2; Б - горизонтальная скоростная карта-срез на глубине 3 км (карта в виде скоростного поля с сечением изолиний 0.2 км/с). Шкала скоростей дана справа

Карта-срез на глубине 11 км отвечает кровле средней коры. На этой глубине существует протяженная область пониженной скорости 6.4-6.6 км/с или прогиб в кровле средней коры, очертания, которого совпадают с наиболее глубокой центральной частью Белого моря. Прогиб окружен с юга и севера областями с высокоскоростными отложениями 6.8-7 км/с. Можно выявить тенденцию приближения положительных структур к центру Беломорской акватории.

2.5 Достоверность полученных сейсмических разрезов

Были определены погрешности по графикам скоростных зависимостей в точках пересечения профилей на данной площади. Учитывая сильную горизонтальную неоднородность в районе исследований, можно считать, что графики демонстрируют достаточно хорошее совпадение скоростей. Среднеквадратическое отклонение не превышает 0.2 км/с.

Доказательством достоверности наших разрезов является также то, что разрезы считаются независимо друг от друга, не было использовано начальной модели (как, например, в томографии), поэтому определения погрешностей являются независимыми определениями.

Положение грабенов в Белом море хорошо известно по геологическим и геофизическим данным и оно увязывается с полученными разрезами. Это также является подтверждением достоверности построенных разрезов.

2.6 Выводы

Получены следующие выводы о геологическом строении региона:

1. Средняя кора вдоль профиля М-2 характеризуется чередованием крутонаклонных разломов одного направления и протяжения. В юго-восточной части профиля на небольших глубинах выделяется область с низким градиентом скорости, которая погружается под верхнюю кору. На скоростном разрезе по параллельному профилю М-4 в его верхнем осадочном слое четко выделяется чередование горстов и грабенов, глубина прослеживания которых достигает 6 км. В кровле верхней коры в центральной части профиля наблюдается крупный провал до глубины 12 км с пониженной на 0.2 км/с скоростью и низким градиентом скорости.

2. На профиле М-5 грабен на пикетах 60-90 км в осадочном слое перекрывается крупной областью повышенной скорости. Прогиб заполнен низкоградиентными породами с пониженной скоростью. Разломы свидетельствуют об обстановке сжатия.

3. На картах срезах: на глубине 3 км в осадочном слое наилучшим образом проявляется строение рифтовой системы Белого моря. На глубине 7 км грабены (6.2 км/с) сближаются к центральной части области исследований. На глубине 11 км существует протяженная область пониженной скорости или прогиб в кровле средней коры, очертания, которого совпадают с наиболее глубокой центральной частью Белого моря.

Глава 3. Сейсмические исследования в Норильском регионе

В настоящей главе обобщены результаты площадных исследований, направленных на изучение строения земной коры в Норильском рудном регионе. Основными материалами в этой работе явились годографы первых вступлений преломленных волн по 8 профилям КМПВ. Проведены обработка сейсмических данных, построение на их основе скоростных разрезов и их сейсмогеологическая интерпретация.

3.1 Геолого-геофизический обзор исследуемого района

В подразделе представлен обзор по тектоническому строению Норильского региона, стратиграфии и геолого-геофизической изученности.

В первом параграфе дается тектоническое описание Норильского региона, который расположен в северо-западной части Сибирской платформы. Он граничит на западе с Западно-Сибирской плитой, на севере с Енисейско-Хатангским прогибом и на востоке с Тунгусской синеклизой. В пределах района располагаются крупные геологические структуры Хантайско-Рыбнинского и Дудинского валов, Тунгусской синеклизы и Норильско-Хараелахского прогиба [Путеводитель ..., 1994]. По Д.И. Мусатову, строение западной части Сибирской платформы рассматривается как результат взаимодействия Тунгусской (или Сибирской) континентальной и Западно-Сибирской океанической мегаплит [Зоненшайн, 1976].

Главная рудоконтролирующая структура района - Норильско-Хараелахский разлом - имеет северо-восточное простирание и представляет собой левосторонний взбросо-сдвиг [Рудакова, 2012].

Для Норильского района типична повышенная мощность континентальной земной коры. В ее пределах установлены аномально высокие скорости распространения продольных сейсмических волн.

Во втором параграфе описывается стратиграфия Норильского рудного района, расположенного в северо-западной части докембрийской Сибирской платформы, вблизи ее современных границ с наложенными структурами мезозойско-кайнозойского возраста [Путеводитель ..., 1994], относящимися к Западно-Сибирской плите и Енисейско-Хатангскому рифтогенному прогибу.

Представлено описание строения платформенного чехла в Норильском регионе. Его мощность превышает 12 км. В разрезе чехла присутствуют карбонатно-терригенные отложения верхнего протерозоя, карбонатно-глинистые сульфатоносные толщи нижнего и среднего палеозоя, вулканогенные породы верхнего палеозоя и мезозоя, а также рыхлые образования мезозоя – кайнозоя [Рудакова, 2012].

Структура Норильского региона определяется сочетанием положительных и отрицательных структурных элементов. На западе и востоке основными элементами являются Дудинский и Хантайско-Рыбнинский валы, сложенные осадочными породами верхнего протерозоя и нижнего палеозоя, а в центральной части –

Норильская, Волгочанская и Хараелахская мульды, заполненные туфолавыми образованиями поздней перми – раннего триаса. От крупной структурной единицы – Тунгусской синеклизы они отделяются Имагино-Летнинским разломом [Рябов и др., 2001].

В третьем параграфе раскрывается геолого-геофизическая изученность района. Исследования, направленные на изучение геологии и полезных ископаемых Норильского региона начинаются с геологической партии Н.Н. Урванцева в 1919, главными результатами которых становится открытие медно-никелевых месторождений «Норильск-I» и «Норильск-II» [Путеводитель ..., 1986]. В период с 1935 по 1985 года проводятся различные геолого-съёмочные, геофизические и геохимические исследования в Норильском регионе, в результате чего открыто Талнахское медно-никелевое месторождение [Путеводитель..., 1986].

Наземными геофизическими методами площадь работ изучена довольно полно [Пузырев и др., 1965; Астахов, Еременко, 1975; Астахов и др., 1978; Голубков и др., 1984; Верещагина, 1989; Павлов, Петров, 1996]. Проведен большой объем гравиметрических работ масштаба 1:50000 с увязкой съёмок по сопредельным площадям (1989 – 1995 гг.). Большой вклад в исследование глубинного строения района внесли результаты современных электроразведочных и сейсморазведочных работ.

В период 2004-2007 гг. на площади проектируемых работ геофизической партией ПГО «Норильскгеология» проводились наземные геофизические работы методами магнитотеллурических зондирований, переходных процессов, вызванной поляризации. Так же проведена гравиметрическая съёмка масштаба 1:25000. По результатам работ построены предварительные геолого-геофизические разрезы и карты района р. Черной.

3.2 Геофизические исследования ТЗ МПВ на Норильской площади в 80-х годах

В подразделе описана методика полевых наблюдений ТЗ МПВ, проведенных в 80-е года в Норильском регионе. Сеть из 8 профилей МПВ была отработана по методике точечных зондирований, предложенной в 60-х годах Н.Н. Пузыревым. Расстояние между пунктами взрыва в среднем составляло 20 км, между стоянками 2-10 км. Полевые наблюдения производились с помощью аппаратурных комплексов Черепаха – М, Тайга-2.

3.3 Результаты интерпретации данных ТЗ МПВ на Норильской площади методом однородных функций

Представлены результаты переобработки и переинтерпретации данных по годографам преломленных волн, зарегистрированных при работах ТЗ МПВ в 80-е гг. прошлого века по 8 профилям, расположенных в Норильском медно-никелевом районе. Профили образуют почти равномерную прямоугольную сеть 50 x 60 км.

Сейсмические годографы (поля времен первых волн) получены по данным отчета о результатах работ ТЗ МПВ, проведенных производственным геологическим объединением «ЕНИСЕЙГЕОФИЗИКА», игарской геофизической экспедицией в 1988 году [Дмитриев М.В., Зайцев Ю.Г., 1988]. Годографы были оцифрованы и переведены во временной разрез равных удалений, с целью интерполяции годографов [Piip, 2001] и контроля над автоматически построенным скоростным разрезом для подтверждения, что полученные на разрезах структуры существуют в наблюдаемом временном поле. Была применена равномерная интерполяция годографов волн в отношении источников и приемников для того, чтобы наиболее полно выявить особенности строения среды при автоматическом построении разрезов и сделать систему наблюдений более равномерной. В отношении точек взрывов годографы интерполированы равномерно с шагом 12.5 км.

На новых автоматически вычисленных сейсмических разрезах по профилям снизу вверх выделены четыре следующие толщи:

1) кристаллический фундамент (AR–PR), скорость от 5.8 до 7.2 км/с, градиент относительно низкий;

2) слой рифейских отложений (заштрихованный на рис. 2 и обозначенный на разрезах как Rf), скорость от 5.8 до 7.2 км/с, градиент скорости имеет средние значения;

3) слой палеозойских отложений (PZ), скорость от 4.8 до 6.6 км/с, градиент скорости повышен;

4) верхнепалеозойские – мезозойские отложения (PZ₃–MZ), скорость от 2 до 5 км/с, градиент скорости отличается высокими значениями. Граница между PZ₃–MZ и PZ отложениями проведена пунктиром синего цвета.

Возраст слоев указан приближенно (условно). Скорость одноименных толщ на различных профилях может изменяться в незначительных пределах. Все указанные толщи автоматически четко разделены на разрезах сейсмическими инверсионными границами (выше границы скорость больше, чем в кровле нижележащего слоя). Эти толщи отличаются величиной скоростного градиента – преобладающим расстоянием между изолиниями скорости.

Новые разрезы непрерывны в том смысле, что значения скорости рассчитаны для каждой точки разреза. Выделенные слои имеют внутреннюю структуру, которая характеризуется полем изолиний скорости. Наименее уверенно на разрезах выделен слой, обозначенный как PZ₃–MZ, вследствие того, что регистрация волн начиналась на некотором расстоянии от пункта взрыва.

На разрезе по субширотному профилю Соленая-Аян длиной 360 км (рис. 2А), который пересекает озеро Пясино в его средней части, Приенисейское поднятие и Турухано – Норильскую структурную зону наблюдается сочленение Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты. Относительно высокоскоростной (от 6.4 до 7.2 км/с) кристаллический фундамент Сибирской платформы вместе с рифейскими?

отложениями погружается под осадочный чехол Западно-Сибирской плиты под углом около 3 градусов от глубины около 5 км в центральной части профиля и до глубины 7 км в западной части. Рифейские отложения, как и вышележащие палеозойские отложения (кембрий?) характеризуются блоковым строением и переменной мощностью. Высокоградиентные складчатые отложения верхнего палеозоя – мезозоя прослеживаются в верхней части разреза на протяжении почти всего профиля. В центральной части, в районе Приенисейского поднятия выклиниваются палеозойские отложения.

Профиль Рыбная-Северная субмеридионального направления (рис. 2Б) проходит к югу от профиля Соленая-Аян. Он простирается от Рыбнинского поднятия на севере до Мундуйской антиклинали на юге, пересекая Дудинскую впадину, Хантайский свод и Курейский прогиб. Длина 340 км. *Фундамент* (AR-PR) представляет собой чередование сводов и прогибов. Наименьшую глубину (4 км) он имеет в областях Хантайского свода и соседней с ним положительной структуры, проходящей под точкой пересечения рассматриваемого профиля и профиля М. Хета – Кета, а также в пределах Мундуйской антиклинали. Наибольшая видимая глубина погружения фундамента 14 км достигается в центральной части профиля под Хантайским вдхр. Скорость в фундаменте изменяется от 5.8 до 7.4 км/с. *Рифейские отложения* заполняют впадины в кристаллическом фундаменте и образуют серию встречных чешуйчатых надвигов на границе Хантайского свода и Курейского прогиба. Внутри слоя скорость увеличивается от 6.2-6.4 до 7.2 км/с, достигая максимальных значений 7.6 км/с в Курейском прогибе на пикетах 220-300 км.

Палеозойские отложения на профиле Рыбная – Северная прослеживаются на протяжении всего профиля. Они обладают изменчивым характером сейсмических свойств по латерали. Так, вдоль профиля можно выделить ряд блоков, каждому из которых присущи свои особенности. Первый блок палеозойских отложений с севера (высокий градиент, скорости 5-6.8 км/с) соответствует, по-видимому, структурам Дудинской впадины. Второй блок (высокий градиент, скорости 5.8-7.4 км/с) можно выделить на пикетах 100-120 км, где находится Хантайское вдхр. Следующий за ним выделяется средними значениями градиента скорости и снижением максимальных значений скорости на 0.4 км/с по сравнению с блоком с севера. Последний блок (до 6.5 км/с) внутри палеозойских отложений приурочен к впадине в рифейских отложениях. Палеозойские породы проникают до глубины 9 км. Градиент скорости внутри блока понижен.

Верхнепалеозойские – мезозойские отложения осадочного слоя (3.2-6 км/с) прослежены практически на протяжении всего профиля, исключением является отрезок на пикетах 125-140 км, где выходят на дневную поверхность породы палеозойского возраста.

Произведено сравнение разрезов прежней и новой интерпретации. Показано, что в целом они достаточно удовлетворительно совпадают во всем регионе, но

разрезы, представленные в рассматриваемой главе, построены автоматически, обладают более сложным строением и несут информацию о внутреннем строении слоев, как по глубине, так и по латерали.

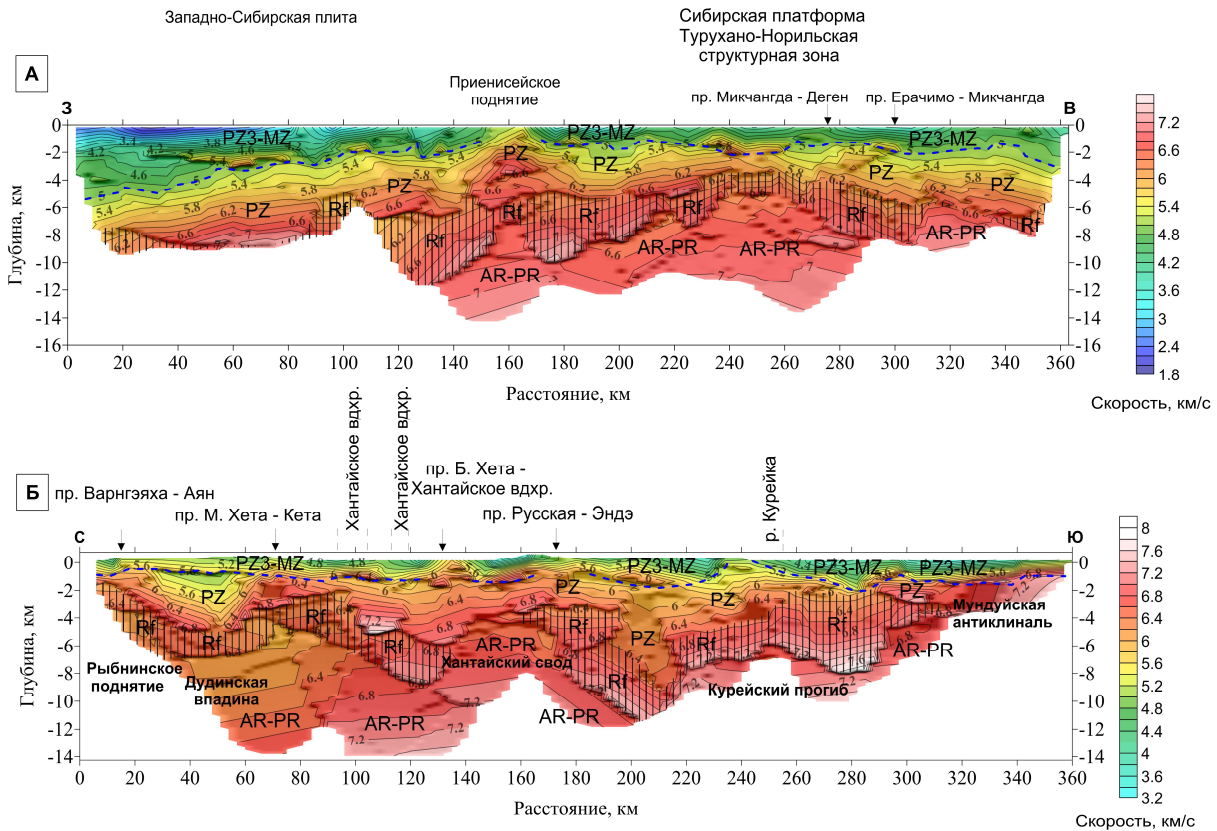


Рис. 2 Сейсмогеологический разрез по профилю: А – Соленая-Аян, Б - Рыбная – Северная. Шаг между изолиниями 0.2 км/с, синим пунктиром обозначена подошва осадочного слоя, штриховкой – области распространения рифейских (Rf) отложений

3.4 Горизонтальные скоростные карты-срезы

Компьютерная технология «ГОДОГРАФ» позволяет создавать скоростные карты-срезы на разных глубинах по профилям на площади исследований. После построения разрезов по всем восьми профилям на исследуемой площади, были объединены данные для построения карт-срезов на абсолютных отметках 3, 4, 6 км. Также было получено объемное изображение поверхности фундамента.

Строение территории хорошо видно на горизонтальной скоростной карте-срезе на абсолютной отметке 4 км – вблизи кровли фундамента (рис. 3). Центральная часть среза с округлой формой размерами 300x300 км имеет почти постоянные значения скорости (6.2 км/с), характерные для фундамента, это подтверждается тем, что кровля отложений фундамента здесь практически горизонтальна. Горизонтальная поверхность этих отложений находится в междуречье Енисея и Курейки.

Также на этой карте-срезе видны места, где залегание кровли образований фундамента отклоняется от субгоризонтального, например, округлая структура на

пересечении профилей Мал. Хета – Кета и Рыбная – Северная. Здесь прослежены значения скорости до 6.6 км/с, это означает подъем отложений к поверхности, так как скорость в этом слое с глубиной увеличивается монотонно. Кроме того, на относительно ровной поверхности среза на восточной части профиля выявлены четыре округлые изометрические зоны с пониженными значениями скорости – от 6.2 до 5.6–5.4 км/с («провалы») размером около 50x50 км. Положение этих зон примерно совпадает с положением крупных озер Кета, Хантайское, Дюпкун и Агата. Возможно, это свидетельствует о том, что эти озера существовали здесь в дорифейское время. Отметим, что субгоризонтальная часть поверхности рифейских отложений в среднем совпадает с выступом кристаллического фундамента. К западу от Енисея кровля рифейских отложений понижается, срез попадает в область развития палеозойских и мезозойских отложений, о чем можно судить по значениям скорости, которая здесь изменяется от 5.8 до 4 км/с.

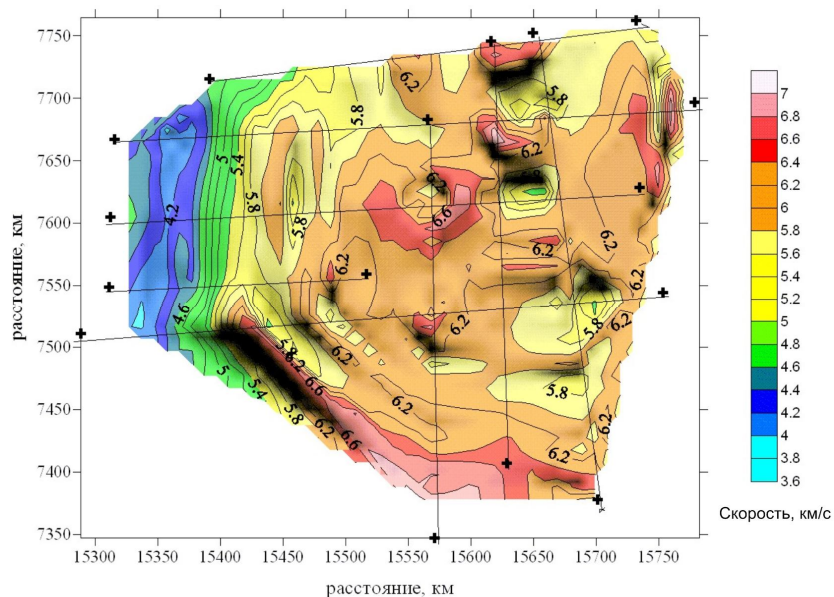


Рис. 3 Горизонтальная скоростная карта-срез на глубине 4 км. Сечение изолиний скорости 0.2 км/с. Шкала скоростей указана справа

Также было построено объемное изображение *поверхности фундамента*. Как и предполагалось по данным гравиметрии в [Геолого-геохимические..., 1989], оно имеет клавишную структуру. В центре области исследований на отметках -3...-5 км прослежена поверхность фундамента, осложненная разветвленным разломом в центре. К этому разлому вблизи профиля Варнгэяха–Аян приурочено Норильское медно-никелевое месторождение. Поверхность фундамента снижается уступами на восток до -10 км, на север и запад до -9–10 км. Как видно, выступ фундамента на исследованной глубине прослеживается только в центральной части площади в междуречье Енисея и Курейки [Пийп и др., 2009].

3.5 Достоверность полученных сейсмических разрезов

В подразделе исследуется достоверность сейсмических разрезов путем сравнения вертикальных скоростных графиков в точках пересечения профилей. Критерием оценки точности построения разрезов является степень совпадения скорости на линиях пересечения субширотных и субмеридиональных профилей КМПВ в Норильском регионе. Все сейсмические разрезы были рассчитаны автоматически и независимо друг от друга. Следовательно, совпадение графиков изменения скорости с глубиной в точках пересечения профилей может говорить о точности построения разрезов и достоверности полученной информации о скоростном поле и границах раздела. Получено 7 кривых изменения скорости от глубины. Вертикальные зависимости показывают, что скорость и градиент скорости достаточно хорошо совпадают в средней части разреза, с учетом того, что профили расположены вкрест и вдоль простирания структур. Невязка по скорости в точках пересечения профилей КМПВ составляет в среднем 0.2 км/с.

3.6 Выводы

В результате переинтерпретации наблюдений прошлых лет установлено: объемное изображение кровли выступа фундамента на отметках от -11 до -2.5 км, который занимает пространство в междуречье Енисея и Курейки, имеет сложное клавишное строение. Выступ фундамента характеризуется разломным, блоковым внутренним строением. Норильское медно-никелевое месторождение приурочено к глубинному разлому, прорезающему выступ фундамента. Рифейские отложения облекают выступ фундамента. Горизонтальная скоростная карта-срез на глубине 4 км показывает субгоризонтальную форму кровли фундамента и дает положение четырех изометричных низкоскоростных зон, которые совпадают с положением крупных озер в регионе. Архейско-протерозойский фундамент с видимой мощностью около 8 км с перекрывающимися образованиями погружается в западном направлении под структуры Западно-Сибирской плиты. Фундамент расположен на глубинах 5-10 км и разбит на блоки размерами 20-30 км. Новый метод интерпретации позволяет автоматически получать и изучать внутреннюю неоднородную структуру слоев, положение разломов, фациальную изменчивость осадочных слоев, внутреннее строение фундамента и трехмерные изображения геологических объектов региона.

Глава 4. Исследования по сверхглубинному профилю ФЕННОЛОРА на Балтийском щите

Глава посвящена изучению литосферы Балтийского щита вдоль профиля ФЕННОЛОРА путем обработки и интерпретации годографов методом однородных функций с учетом кривизны Земли [Пийп, 2009].

В качестве исходных материалов для получения сейсмических разрезов были использованы наблюдаемые годографы по этому профилю на всем протяжении от

Баренцева до Балтийского морей по материалам В.С Guggisberg'a. В результате был получен сейсмический разрез общей протяженностью 2000 км и глубиной до 200 км и было произведено сравнение нового разреза с результатами интерпретации Guggisberg'a, произведенной по тому же профилю.

4.1 Глубинное строение исследуемого района

В подразделе представлен обзор по тектонике, стратиграфии и геолого-геофизической изученности Балтийского щита.

В первом параграфе описывается тектоника самого обширного на Восточно-Европейской платформе выступа кристаллического фундамента, занимающего территорию Карелии и Кольского полуострова, Финляндию и большую часть Скандинавского полуострова. Геология Балтийского щита освещена многими исследованиями [Милановский, 1996; Шаров, 1993]. В тектоническом отношении Балтийский щит подразделяется на три основные области – Кольско-Карельскую, Свекофеннскую и Свеконорвежскую.

Кольско-Карельская область характеризуется широким развитием архейских метаморфических образований, среди которых присутствуют менее метаморфизованные осадочные и вулканогенные, а также интрузивные породы нижнего протерозоя. Основные процессы погружения, вулканизма и интрузивного магматизма, интенсивных деформаций и глубинного метаморфического преобразования пород в этой области происходили в архее, а в раннем протерозое они характеризовались орогенным, а затем протоплатформенным режимом, осложненным развитием рифтоподобных впадин.

В Свеконорвежской области в основном развиты глубокометаморфизованные породы архея или нижнего протерозоя, которым подчинены небольшие участки развития более слабо метаморфизованных осадочно-вулканогенных, а также интрузивных образований нижнего и среднего рифея. Большинство исследователей рассматривают эту область как выступ досвекофеннского основания, подвергавшийся тектономагматической переработке или даже вовлекавшийся в геосинклинальный процесс в первой половине позднего протерозоя.

Кольско-Карельская область по возрасту слагающих ее образований и по времени основных тектонических деформаций и метаморфических процессов может считаться древнейшим ядром Балтийского щита. В ней выделяются три вытянутые в северо-западном направлении мегазоны, существенно различающиеся по распространенности и характеру строения архейских и нижнепротерозойских образований и истории развития в раннем докембрии. Это широкие Кольская и Карельская мегазоны и разделяющая их более узкая Беломорская мегазона, которая простирается вдоль юго-западного побережья Белого моря, выклиниваясь к северо-западу от Кандалакшской губы.

Во втором параграфе дается стратиграфическое описание Балтийского щита, крупной геоструктуры, входящей в состав Восточно-Европейской платформы. Он в подавляющей своей части сложен архейскими и нижнепротерозойскими метаморфическими и интрузивными образованиями. Лишь на небольших его участках присутствуют верхнепротерозойские и палеозойские породы.

На кристаллических породах Балтийского щита залегает покров рыхлых отложений, мощность которого обычно измеряется метрами, редко десятками метров и лишь в исключительных случаях превышает 100 м. Он представлен мезозойскими и кайнозойскими образованиями. Доминируют в его составе по мощности и распространению морена и водно-ледниковые осадки поздневалдайского оледенения.

Обзор геолого-геофизической изученности представлен в третьем параграфе. На территории Балтийского щита на данный момент выполнен большой объем региональных сейсмических работ, направленных на изучение глубинного строения земной коры и мантии [Prodehl, Kaminski, 1984; Husebye, Hovland, 1986; Grad, Luosto, 1987; Guggisberg et al., 1987, 1991; Kinck, Husebye, 1988; Grad et al., 1991, 1993; Sharov, 1991; Structure..., 1991]. С 1972 по 1989 года были проведены международные проекты по сверхдлинным профилям ФЕННОЛОРА, СВЕКА, БАЛТИК, ПОЛАР, ФИНЛЕП, КВАРЦ, РУБИН, программам BABEL, EUGENO-S и др. [Галдин и др., 1985; EUGENOS Working Grup, 1988; Luosto, 1990; Guggisberg et al., 1991; The BABEL Project..., 1992; Шаров, 1993; Золотов и др., 2000; Глубинное строение..., 2001]. Геологическая интерпретация разреза по профилю Феннолора приведена в настоящей работе ниже.

4.2 Геофизические исследования по профилю ФЕННОЛОРА в 1979 году

В подразделе кратко дается информация о методике проведения работ по профилю ФЕННОЛОРА. На профиле, простирающемся через Балтийский щит, расположено девять пунктов взрыва, расположенных от северной части Польши до мыса Нордкап. Исследования по профилю проводились по системе точечного профилирования при среднем расстоянии между пунктами взрыва около 300 км и 3-12 км между регистрирующими станциями. Такая система наблюдений позволила в общих чертах изучить скоростные параметры земной коры и верхней мантии и уверенно установить глубины залегания поверхности М и вдоль линии профиля [Литосфера ..., 2004]. Исследование глубинного строения коры и верхней мантии вдоль профиля ФЕННОЛОРА было ранее произведено несколькими авторами [Abramovitz et al, 2002; Guggisberg, Berthelsen, 1987].

4.3 Интерпретация данных по профилю ФЕННОЛОРА методом однородных функций с учетом кривизны Земли

При интерпретации длинных годографов, какие были получены вдоль профиля ФЕННОЛОРА, для построения сверхглубоких разрезов необходимо учитывать кривизну Земли. Однако большинство методов созданы и используются только для

случая “плоской Земли”, в числе прочих, к ним относится и метод однородных функций. В работах [Гервер, Маркушевич, 1968; Muller, 1971] подробно и полно описаны преобразования от сферической Земли к плоской модели и обратно в предположении, что Земля является сферически симметричной, то есть скорость зависит только от радиуса. В работе [Пийп, 2009] показано, что эти преобразования справедливы для двумерно-неоднородной круглой Земли. В статье [Пийп, 2009] опубликованы формулы преобразований годографов, заданных на линии полуокружности, в случае произвольного изменения скорости внутри полукруга в годографы для случая полуплоскости. После введенных преобразований поля времен соответствуют декартовым координатам, т.е. плоской земле, когда источники колебаний расположены на поверхности. Следовательно, годографы, зарегистрированные на сверхдлинных расстояниях от источника, после введенных преобразований можно интерпретировать любым методом, который справедлив для случая плоской двумерно-неоднородной среды, а затем результат можно преобразовать обратно к двумерно-неоднородной модели заданной на полуокружности.

В результате, в автоматическом режиме методом однородных функций с учетом кривизны Земли был построен разрез земной коры и верхней мантии глубиной до 200 км (рис. 4).

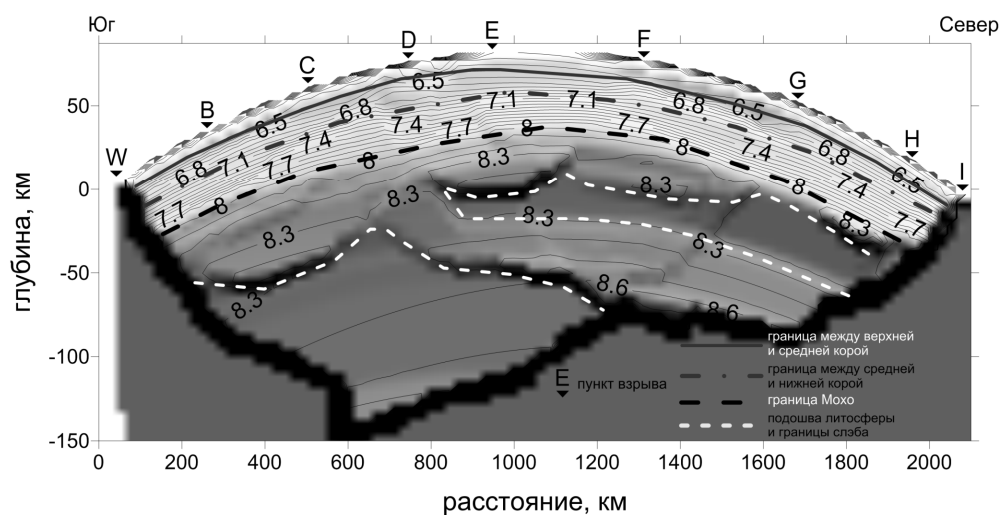


Рис. 4 Разрез земной коры и верхней мантии по профилю FENNOLORA с учетом кривизны Земли

На этом разрезе земная кора на всем протяжении профиля имеет трехслойную структуру с четко выделяемыми границами раздела. Мощность земной коры варьирует от 40 до 50 км. Верхняя кора прослеживается на всем протяжении профиля и имеет относительно выдержанную мощность 10 - 17 км и скорость от 6 до 6.5 км/с. Кровля средней коры (6.5 км/с) и кровля нижней коры (7.1 км/с) также видны на разрезе. Земная кора отделена от верхней мантии четкой границей второго рода, на которой резко падает градиент скорости (величина градиента является кратной

расстоянию между изолиниями), скорость вблизи границы Мохо 8 км/с. Ниже прослеживается неоднородная литосфера с переменной мощностью от 60 км на юге до 10 км на севере и скоростью 8-8.4 км/с, градиент скорости относительно повышен. В центральной части разреза на пикетах 600-800 км и на глубине около 100 км из литосферы отделяется наклонный слой с примерно такими же параметрами, как и литосфера (скорость 8.3-8.6 км/с, относительно повышенный градиент) и мощностью 25-45 км. Этот слой погружается в северном направлении. Вмещающая слой мантия является слабо градиентной со скоростью от 8.3 км/с - это астеносфера. Скорость в астеносфере слабо возрастает до 8.6 км/с на глубине 170 км.

При сравнении результатов Guggisberg'a и новой интерпретации показано, что хотя разрез Guggisberg'a отличается большой глубиной (до 270 км) и достаточно большой детальностью, он построен методом моделирования [Abramovitz et al, 2002] и, как следствие, у него есть ряд существенных недостатков. Главным из которых является необходимость в уточнении заданных предварительно скоростных моделей интерпретатором, а также в необходимости большого количества априорной информации для создания таких моделей. Кроме того, метод моделирования это метод перебора моделей с помощью многократного решения прямой задачи. Конечная детальность полученного разреза не может быть установлена однозначно, результат зависит от выбранной начальной модели.

4.4 Выводы

Интерпретация выполнена с учетом кривизны Земли с использованием компьютерного пакета программ «Годограф», основанного на методе однородных функций. Результаты работы свидетельствуют о высокой эффективности метода. Главные новые геологические результаты касаются глубинных частей коры и верхней мантии, где все другие методы дают или низкую детальность, или недостаточную достоверность. Исходя из результатов обработки данных по исследуемому профилю, в верхней мантии установлено существование высокоскоростного и относительно высоко градиентного слоя, который имеет слабый наклон к северу.

Заключение

Выполнены исследования в трех регионах: в Белом море, в Норильском регионе (площадные интерпретации) и по сверхглубинному профилю Феннолора. Исследования показали эффективность метода однородных функций для изучения регионов с использованием метода преломленных волн. Получены следующие выводы:

1. Использование модели среды с однородной функцией скорости возрождает метод преломленных волн в сейсморазведке во всех его модификациях;

2. В центральной части осадочного слоя и верхней коры Белого моря существует провал сложной формы до глубины 12 км в районе Керецкого грабена. Установлены положение и размеры вглубь этого провала;

3. Переинтерпретация данных площадных работ КМПВ в Норильском регионе существенно уточнила трехмерную форму и размеры поднятия фундамента, облученного осадочными слоями;

4. В астеносфере на Балтийском щите по профилю ФЕННОЛОРА прослежен непрерывный мощный высокоскоростной и высокоградиентный слой, погружающийся к северу.

Публикации по теме диссертации

Статьи в реферируемых журналах:

1. **Цыдыпова Л.Р.**, Гоев А.Г., Пийп В.Б. Сейсмический разрез верхней мантии по профилю «FENNOLORA» (Балтийский щит) на основе двумерно-неоднородной модели среды // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2012. №5. С. 41-46.
2. Пийп В.Б., **Цыдыпова Л.Р.**, Мелихов В.Р., Ахметов А.А. Геологические структуры в соответствии с новой интерпретацией сейсмических данных прошлых лет в регионе Норильского медно-никелевого месторождения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2012. №3. С. 43-51.
3. Пийп В.Б., **Цыдыпова Л.Р.**, Шалаева Н.В., Теплякова Е.А. Глубинное строение земной коры Белого моря по сейсмическим данным // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2011. №3. С. 61-67.

Тезисы конференций:

1. **Tsydyпова L.R.**, Goev A.G. Seismic cross section of upper mantle along the profile FENNOLORA based on two dimensional inhomogeneous model of medium // 74th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2012, Copenhagen, Denmark, 4-7 June 2012.
2. **Цыдыпова Л.Р.**, Пийп В.Б. Строение земной коры по профилю Евробридж на основе новой интерпретации сейсмических данных // Научная конференция «Ломоносовские чтения», Москва, ноябрь 2011.
3. **Цыдыпова Л.Р.** Строение Земной коры в районе Белого моря по сейсмическим данным // XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «ЛОМОНОСОВ», Москва, 13-18 апреля 2009. С. 29-30.
4. **Цыдыпова Л.Р.** Обработка и интерпретация сейсмических данных по Белому морю методом однородных функций // Российская конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященная «Году Планеты Земля», Москва, 6-7 апреля 2009. С. 191-195
5. **Цыдыпова Л.Р.**, Ахметов А.А. Строение Земной коры по сейсмическим данным на северо-западе Сибирской платформы // III Всероссийская научно-практическая конференция «ГЕОПЕРСПЕКТИВА-2009», Москва, 25 марта 2009. С. 108-109.
6. Piip V.B., Melikhov V.R., **Tsydyпова L.R.**, Akhmetov A.A. Structure of ancient strata at the northwest of the Siberian platform on base of reprocessing of 80th years seismic refraction data // II EAGE/EAGO/SEG International Geoscience Conference&Exhibition – Tyumen, Russia, 2-5 March 2009. P. 64-66.
7. **Цыдыпова Л.Р.** Глубинное строение Земной коры по сейсмическим данным в районе Норильского медно-никелевого месторождения // XIV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «ЛОМОНОСОВ», Москва, 11-14 апреля 2007. С. 73.