

Санкт-Петербургский государственный университет

ХОСНУЛЛИНА Тансылу Ильнуровна

Выпускная квалификационная работа

**АНАЛИЗ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ
ПРИ ГЛУБИННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗЕМНОЙ КОРЫ
С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Основная образовательная программа бакалавриата
05.03.01 «Геология»

Научный руководитель:
Институт наук о Земле,
кафедра геофизики, к.физ.-мат.н.,
доцент, Сакулина Тамара Сергеевна

Рецензент: ведущий геофизик
отдела глубинных геофизических
исследований ФГБУ «ВСЕГЕИ»,
к.г.-м.н., Рыбалка Александр
Викторович

Санкт-Петербург
2023

АННОТАЦИЯ

Данная работа посвящена анализу волновых полей при глубинных сейсмических зондированиях (ГСЗ) с использованием математического моделирования. Целью работы является исследование природы и динамических особенностей сейсмических волн для разных моделей земной коры с помощью математического моделирования в рамках горизонтально-слоистой модели. Рассчитаны синтетические сейсмограммы и по ним выделены основные особенности волновых полей для 4-х типов земной коры (континентальная, океаническая, субконтинентальная и субокеаническая). Выполнено моделирование при наличии переходной зоны «кора-мантия». Отражённые волны от кровли и подошвы разделяются по времени и в зависимости от её мощности и градиента скорости изменяется их интенсивность. Оценено влияние изменения градиента скоростей в верхнем и нижнем слоях на интенсивность рефрагированных и преломлённо-рефрагированных волн соответственно.

Объем работы составляет 32 страниц, 13 иллюстраций, 3 таблицы. Работы разделена на 4 главы.

ABSTRACT

This work is dedicated to analysis of wave fields in deep seismic sounding (DSS) of the Earth crust using mathematical modeling. The objective is to study the nature and dynamic features of the waves for different types of the earth crust based on mathematical modeling within the framework of a horizontally layered model. Synthetic seismograms were calculated and the main features of wave fields for 4 types of the earth's crust (continental, oceanic, subcontinental and suboceanic) were identified from them. Modeling was performed in the presence of the transition zone "crust-mantle". The reflected waves from the roof and the base are separated in time and, depending on its power and velocity gradient, their intensity changes. The effect of changing the velocity gradient in the upper and lower layers on the intensity of refracted waves was estimated.

Work contains 32 pages, 13 illustrations, 3 tables. Work is divided into 4 chapters.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ТИПЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ.....	7
ГЛАВА 2. ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ «TESSERAL-2D».....	11
ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В ГСЗ.....	16
ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ В ЗОНЕ ПЕРЕХОДА «КОРА-МАНТИЯ»	24
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	31
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	32

ВВЕДЕНИЕ

Информация о глубинном строении Земли основывается главным образом на анализе данных, полученных геофизическими методами. Результаты сейсмических исследований являются основой для получения глубинных моделей строения Земли. Применение метода глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) позволяет получить представление о строении земной коры в районах с разной структурой и геологической историей. Корреляция данных ГСЗ для разных районов и сопоставление особенностей коры с геологической историей территорий позволяет судить о направленности геодинамических процессов.

Наблюдаемые волновые поля разных тектонических зон отражают разнообразие в строении коры. Однако границы в разных структурах не являются непрерывными, что затрудняет корреляцию отдельных волн. Это может быть связано с неоднородностью границ, с прерывистостью их свойств, их сложностью или с явлениями интерференции разных видов волн.

Актуальность работы. На сейсмических записях выделяются волны, связанные с границами в осадочном чехле, фундаментом, границами внутри коры и мантией. Волновая картина глубинных сейсмических зондирований сложная и на реальных сейсмических записях не всегда возможно объяснить динамические особенности волн, также часто встречается несоответствие реальных волновых полей с теоретическими представлениями. Для корректной интерпретации волновых полей в ГСЗ необходимо изучить, какая часть прерывистого поля обусловлена с неоднородностями среды, а какая связана вторичными интерференционными явлениями. Для решения данной задачи используется математическое моделирование. Моделирование позволяет получить важные выводы об особенностях и признаках волн, которые наблюдаются на реальных сейсмических записях при изучении того или иного геологического объекта. Выделение и оценка особенностей поля для разных типов структур земной коры позволит районировать область исследований на этапе анализа данных ГСЗ.

Цель: исследовать природу и динамические особенности сейсмических волн для разных моделей земной коры с помощью математического моделирования в рамках горизонтально-слоистой модели.

Задачи:

- Подготовить теоретический обзор по типам земной коры:
 - Современные представления о типах земной коры;

- Характеристика волновых полей, наблюдаемых при глубинных сейсмических зондированиях (ГСЗ) в пределах горизонтально-слоистой модели;
- Выполнить анализ волновых полей ГСЗ для основных моделей земной коры;
- Исследовать влияние параметров переходной зоны «кора-мантия» на динамику преломлённых и отражённых волн от границы Мохо.

Данная работа построена на материалах, полученных во время производственной практики в отделе глубинных геофизических исследований ФГБУ «ВСЕГЕИ».

Выпускная квалификационная работа выполнялась с привлечением следующих специализированных программ:

- 1) Tesseral-2D (<http://www.tesseral-geo.com/>);
- 2) SeisPro (<https://xn--e1aipdfcc.xn--p1ai/>).

ГЛАВА 1. ТИПЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Типовые особенности скоростных моделей земной коры связаны с тектоническим строением и историей развития различных геоструктур. Главными принципами при разделении земной коры на типы являются различия по мощности, особенностям скоростных параметров, внутреннему строению и составу слагающих её слоев. По этим параметрам выделяют несколько типов земной коры, но основными являются континентальная кора и океаническая кора (Кашубин, 2013).

Континентальная кора, мощностью в среднем 30-50 км в пределах равнин и 60-80 км в горных областях, имеет верхнюю осадочную и нижнюю консолидированную толщи. Иногда осадочный слой может отсутствовать на участках, где на поверхность выходят древние магматические и метаморфические породы. Мощность осадочного слоя составляет в среднем 2-3 км, которая сложена преимущественно осадочными и вулканическими породами, скорость в осадочном слое варьирует от 2.0 км/с до 4.5 км/с. Осадочный слой в коре является неравномерным и более толстым, существуют районы, где мощность слоя составляет две трети толщины коры.

Типизация земной коры менялась со временем. Сначала рассматривались представления о двухслойной (гранито-базальтовой) континентальной коре. Граница, разделявшая гранитный и базальтовый слои, носила название граница Конрада. Однако она распространялась не повсеместно, и определить её положение не всегда возможно. На основании большого объема геофизических исследований и наблюдений обратились к другой модели, где земная кора является многослойной и имеет сложную структуру (Резанов, 2002). Делить её только по вещественным признакам является некорректным. В наше время проблема исследования геологической природы сейсмических границ в консолидированной коре остается нерешенной и требует дальнейшего изучения.

В современном представлении выделяют три этажа консолидированной коры достоверно отличающиеся по скоростным уровням. Верхний этаж является высокоградиентным и занимает около трети коры. Он хорошо изучен и имеет гранито-метаморфический состав, скорость продольных волн в котором варьирует от 5.8 км/с до 6.4 км/с. Средний (промежуточный) слой является малоградиентным, состав которого отличается от верхнего большей основностью, а скорость составляет 6.5-6.7 км/с. Этот слой не всегда может быть зафиксирован головными преломленными волнами, о сейсмических свойствах удается судить только по отраженным и обменным волнам. Мощность средней коры может составлять от одной трети до половины всей консолидированной коры. Внутренняя структура нижнего слоя имеет повышенные градиенты скоростей (6.8-7.2 км/с)

и незначительную тонкую горизонтальную расслоенность (Кашубин, 2011). Нижний этаж облекает поверхность мантии, то есть повторяет его рельеф. Нижняя кора может являться преобразованием мантийного вещества гранулит-базитового состава, что говорит об основном составе и высокой степени метаморфизма слагающего его вещества.

Океаническая кора отличается от континентальной по мощности и составу. Мощность ее составляет в среднем 6-7 км и не превышает 10-15 км. Сверху вниз в океанической коре выделяются три слоя. Верхний слой рыхлых морских осадочных пород имеет небольшую мощность до 1 км, что связано с удаленностью океанического пространства от источников сноса и переотложением осадков на дне океана. Средний слой, представленный переслаиванием базальтов, карбонатных и кремнистых пород, мощностью 1-3 км, имеет скорость 5.0-6.0 км/с. Нижний слой, сложенный основными породами типа габбро и диоритами мощностью 3,5-5 км, имеет скорость продольных сейсмических волн более 6.6 км/с (Кашубин, 2013). Скорости на границе Мохо в области океанической коры изменяются в пределах от 7.8 до 8.6 км/с.

Основные отличия океанического и континентального типов коры: в океанической коре отсутствует верхняя (кислая) кора; мощность последнего слоя океанической коры меньше мощности нижнего слоя консолидированной коры континентального типа при близких значениях их скоростей (рис.1).

Ещё одной отличительной особенностью океанической коры является слабая изменчивость её мощности и средней скорости на огромных пространствах океанов. Однако существует утолщённая океаническая кора, которая наблюдается вблизи континентов, в глубоких частях окраинных и внутренних морей и в районах горячих точек. В последнем примере отличительной особенностью является наличие мощного слоя со скоростями 7.6 км/с в основании, которая может являться частью верхней разуплотнённой мантии (коромантийный слой).

При классификации земной коры выделяют два типа переходной коры: субконтинентальная кора и субокеаническая кора.

Субконтинентальная кора мало отличается по скоростной модели от континентальной. Её общая мощность составляет около 20-30 км, наблюдается сокращение толщины верхней коры до 5 км. Данный тип коры встречается на океанических поднятиях и окраинах континентов.

Субокеаническая кора имеет общую мощность коры 10-25 км, причем она увеличена преимущественно за счет осадочного слоя, залегающего непосредственно на нижнем слое океанической коры. Особенностью данного типа коры является повышенные скорости в консолидированной коре и подъем границы Мохо (Косминская, 1968).

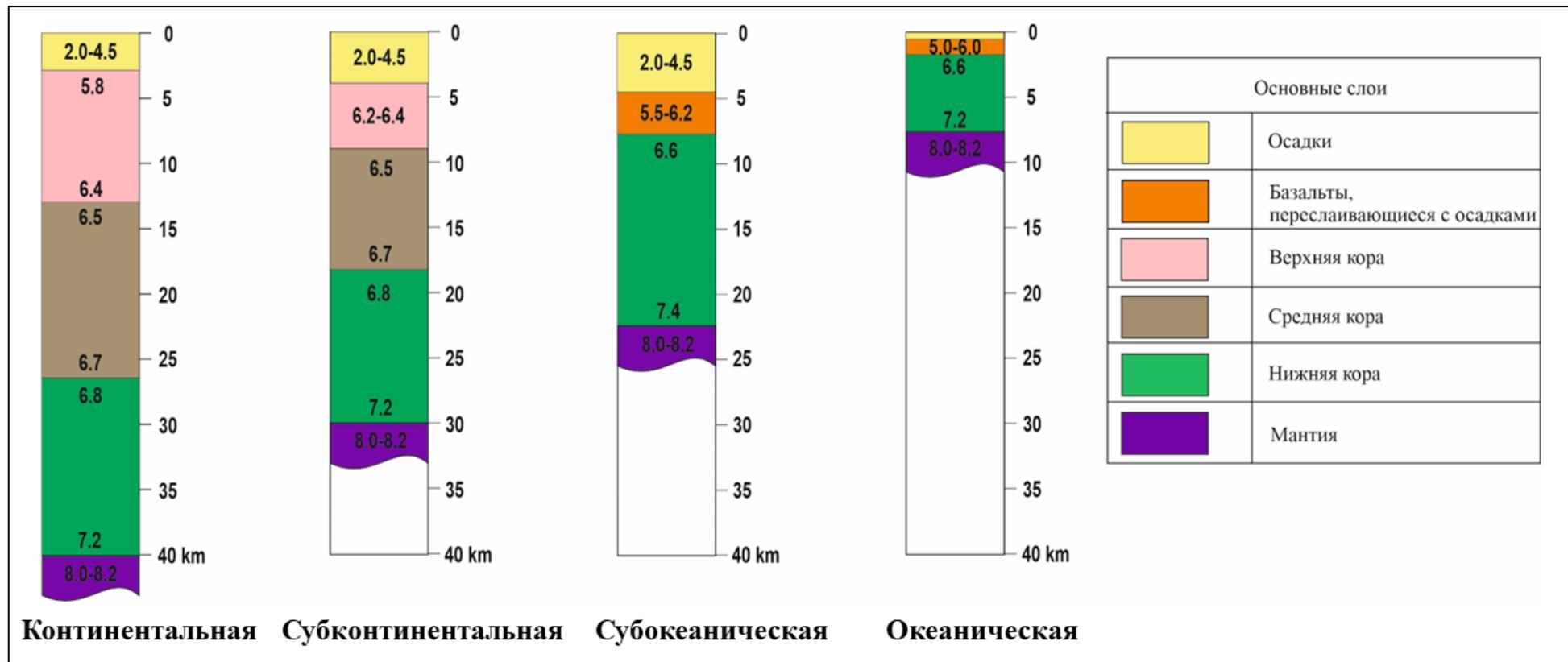


Рисунок 1. Основные типы земной коры.

Субокеаническая кора связана с котловинными частями окраинных и внутриконтинентальных морей и рифтовыми грабенами.

При анализе скоростных разрезов коры от океанического к континентальному можно говорить о двух причинах утолщения коры. Первая – возрастание толщины коры за счет осадочного слоя при переходе от океанического к субокеаническому, который вследствие под действием метаморфизма и тектогенеза превращается в консолидированную кору. Вторая причина – толщина коры возрастает за счет появления дополнительных слоев в консолидированной толще при переходе от субконтинентального к континентальному типу, они образовались из-за дифференциации мантии и выделения более легких компонентов из нее.

Существует множество классификаций коры по типам и подтипам, в данной работе рассматриваются характеристики только главных типов коры. Целью работы является получение общего представления о структуре волновых полей, наблюдаемых в ГСЗ для четырех типов коры, а также оценка влияния различных параметров моделей на динамические особенности волновых полей, регистрируемых при ГСЗ.

ГЛАВА 2. ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ «TESSERAL-2D»

Программа «Tesseral-2D» (Tesseral Technologies Inc, Канада, www.tesseral-geo.com) предназначена для 2D моделирования волновых полей. Она позволяет не только рассчитать синтетические сейсмограммы, но и визуализировать мгновенные снимки распространяющихся фронтов волн, что используется для анализа сложных волновых полей (т.е. определение типа волн, формирующего волновое поле в конкретный момент времени). Пакет использует точную и быструю схему вычислений, основанную на методе конечных разностей (Kelly, 1976), что дает возможность в короткие сроки выполнять моделирование сложных геологических сред.

Моделирование в программе Tesseral-2D производилось на основе акустического волнового уравнения. Данный вид моделирования позволяет не учитывать упругость твердой среды, в которой скорость волн сдвига равна нулю. В качестве свойств среды используются значения скорости продольных волн и плотность.

Программный пакет Tesseral-2D состоит из четырех основных функциональных блоков: построитель модели, вычислительный блок, визуализатор и блок обработки сейсмических данных. При выполнении моделирования автором использовались первые три блока:

1) Построитель моделей позволяет создавать двумерную скоростную и плотностную модель геологического разреза, задавать систему наблюдения, состоящую из источников и приемников колебаний, и затем выполнить одну из моделирующих программ из вычислительного блока.

2) Вычислительный блок рассчитывает синтетические сейсмограммы, временные разрезы и серии «мгновенных снимков» волнового поля.

3) Визуализатор используется для отображения исходной скоростной модели среды и всех основных результатов вычислений, в частности, при моделировании – синтетических сейсмограмм и «снимков» волнового поля.

Особенностью наблюдений ГСЗ являются большие расстояния источник- приемник (до 250 км и более) и соответственно большие времена регистрации сейсмических волн от глубинных границ в земной коре (до 40 сек и более). Поэтому при выборе параметров для вычисления волнового поля при моделировании синтетических сейсмограмм ГСЗ очень важным является нахождение компромисса между разрешённостью сейсмической записи и временем вычислений.

Были выбраны следующие общие параметры для моделирования, которые отображены в таблице 1:

Параметры моделирования

Таблица 1

Параметр	Значение
Максимальное удаление источник приемник	250 км
Шаг между приемниками	2500 м
Размер модели	250×100 км
Вид сигнала	Rikker
Частота сигнала источника	5,10 Гц
Длина сейсмической записи	40 с
Шаг дискретизации	0.008 с

В работе было проведено тестирование с целью оценки влияния параметров для вычисления волнового поля (размер модели, размер модельной ячейки, частота сигнала и др.) на качество синтетических сейсмограмм и время их расчета.

В ходе тестирования выяснилось влияние размера модельной ячейки на временную разрешённость сейсмической записи: чем меньше размер ячейки, тем больше разрешенность записи. Размер модельной ячейки может определяться программой автоматически из набора следующих заданных параметров: скоростью продольной волны (V_{pmin}), длиной волны (λ_{min}), частотой источника ($f_{ист}$). Источник представлен в виде точечного объекта, важным параметром которого является преобладающая частота, от неё зависит временная разрешённость записи.

В программе представляется возможность задать произвольный размер ячейки и тем самым управлять разрешенностью записи. Время вычислений волнового поля также напрямую зависит от размеров заданной модели и выбранной длительности сейсмической записи.

На синтетических сейсмограммах присутствуют краевые эффекты моделирования – отражения от бокового края модели и от нижней кромки модели. Для их исключения из сейсмограмм рекомендуется увеличить размеры модели и прежде всего по глубине.

Ниже представлены 3 варианта тестирования с разными значениями параметров для модели с одной границей на глубине 20 км и скоростями в вышележащем и нижележащем слоях 6.5 км/с и 8.0 км/с соответственно (табл. 2., рис. 2).

К результатам тестирования программы Tesserat-2D

Таблица 2

Параметры	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Размер пространственной модели	250×100 км		
Длина сейсмической записи	40 с		
Шаг дискретизации	0.008 с		
Размер модельной ячейки (dz × dx)	47×34 м	47×34 м	23×17 м
Преобладающая частота источника	10 Гц	5 Гц	5 Гц
Длина волны	600 м	1250 м	1250 м

Вариант 1. Преобладающая частота источника -10 Гц. Размер модельной ячейки был выбран по умолчанию программой автоматически. На сейсмической записи наблюдается многофазность сигнала. Время вычислений составило 20 минут.

Вариант 2. Преобладающая частота источника уменьшена и равна 5 Гц. Размер модельной ячейки был выбран равному в 1-ом варианте. Наблюдается уменьшение многофазности сигнала и увеличение временной разрешённости сейсмограммы. Время вычислений составило 56 минут.

Вариант 3. Преобладающая частота источника - 5 Гц. Размер модельной ячейки уменьшен в два раза (23×17м). Сейсмическая запись имеет лучшую разрешенность из всех трех вариантов как в докритической, так и в закритической областях. Продолжительность вычислений в этом случае составил более 12 часов.

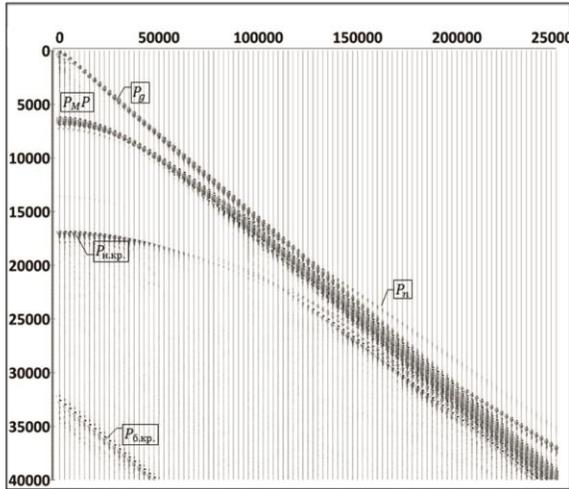
Проанализировав волновые картины при разных частотах источника и размерах модельной ячейки, был выбран второй вариант как самый оптимальный с точки зрения временной разрешенности сейсмической записи и времени вычислений.

В ходе освоения в программе Tesserall-2D было выявлено следующее:

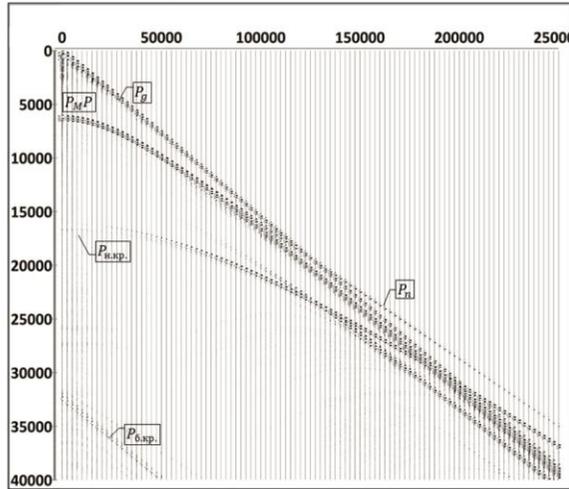
- принцип выбора размера ячейки сетки вычислений волнового поля по умолчанию программой связан с частотой сигнала: с уменьшением частоты размер модельной ячейки увеличивается, при увеличении частоты сигнала наблюдается его уменьшение;
- многофазность сигнала напрямую зависит от размера ячейки модели: чем больше размер ячейки, тем хуже разрешённость сейсмической записи. Поэтому выбранные

а

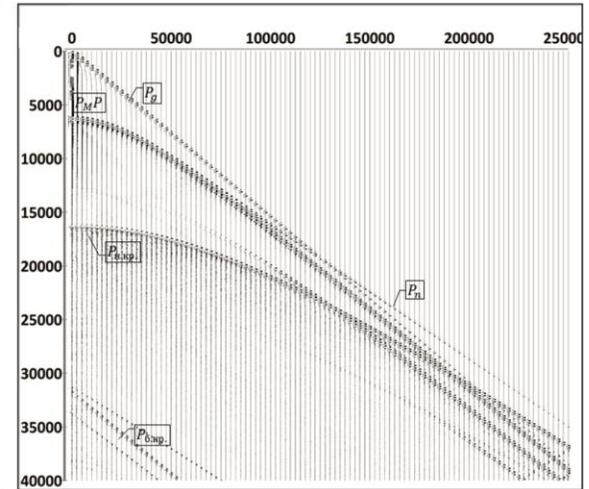
$f = 10 \text{ Гц}$
 $dz - dx = 47 - 34 \text{ м}$
 $t = 20 \text{ мин}$



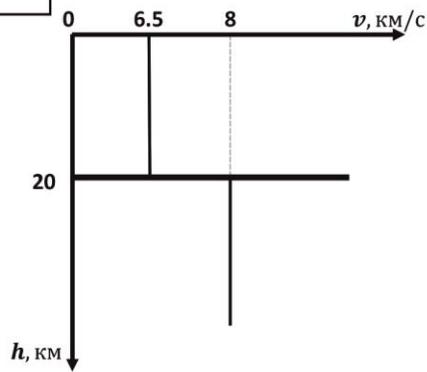
$f = 5 \text{ Гц}$
 $dz - dx = 47 - 34 \text{ м}$
 $t = 56 \text{ мин}$



$f = 5 \text{ Гц}$
 $dz - dx = 23 - 17 \text{ м}$
 $t = 12 \text{ ч}$



б



Уловные обозначения:

P_g – Прямая волна;

P_n – преломлённая волна от Мохо;

P_{MP} – отражённая волна от Мохо;

$P_{б.кр.}$ – отражённая волна от боковой кромки модели;

$P_{н.кр.}$ – отражённая волна от нижней кромки модели.

Рисунок 2. Синтетические сейсмограммы (а), рассчитанные для модели (б) с разными параметрами.

автоматически программой параметры необходимо корректировать для лучшей разрешённости, при этом учитывать времеемкость вычислений;

– необходимо учитывать технические возможности используемых персональных компьютеров, это напрямую влияет на время вычислений при моделировании.

Для представления результатов моделирования в дипломной работе использовалось программное обеспечение SeisPro, предназначенное для комплексной обработки и контроля качества сейсмических данных. Данный программный пакет имеет более удобный инструмент визуализации, включая выбор масштаба и вида представления данных, а также редуцирование сейсмической записи.

ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В ГСЗ

С целью получения общих представлений о волновых полях, которые регистрируются при регистрации ГСЗ, автором было рассмотрено моделирование для 4-х типов земной коры, рассмотренных в главе 1.

В рамках слоисто-однородной модели было выполнено волновое моделирование, результатом которого являются синтетические сейсмограммы, а также автором рассчитаны годограф отраженных и преломленных волн. А комплексирование этих двух подходов позволило легче разобраться в сложном волновом поле при идентификации волн.

В рамках слоисто-градиентной модели было выполнено волновое моделирование в программе тессерал. Результаты моделирования для слоисто-однородных моделей в виде синтетических сейсмограмм с наложенными на них годографами отраженных и преломленных волн представлены на рисунке (рис.3, 4, 5, 7, 8). А для слоисто-градиентных моделей синтетические сейсмограммы представлены на рисунке (рис.9)

На синтетических сейсмограммах указаны основные отраженные и преломленные волны от границ земной коры, условные обозначения которых представлены в таблице 3.

Условные обозначения основных волн

Таблица 3

Обозначение	Наименование
P_{VP}	Отражённая волна от кровли верхней коры
P_g	Преломлённая волна от кровли верхней коры
P_{cP}	Отражённая волна от кровли средней коры
P_c	Преломлённая волна от кровли средней коры
P_{LP}	Отражённая волна от кровли нижней коры
P_L	Преломлённая волна от кровли нижней коры
P_{MP}	Отражённая волна от границы Мохо
P_n	Преломлённая волна от границы Мохо
P_{MIP}	Отражённая волна от границы внутри мантии

Для **континентальной коры** (рис.3) рассматривается модель с мощностью 40 км. Коровые волны (P_g) связаны с кровлей верхней консолидированной коры, интервал их прослеживания на первых вступлениях составляет от 10 км до 90-100 км с кажущейся скоростью 6.1 км/с.

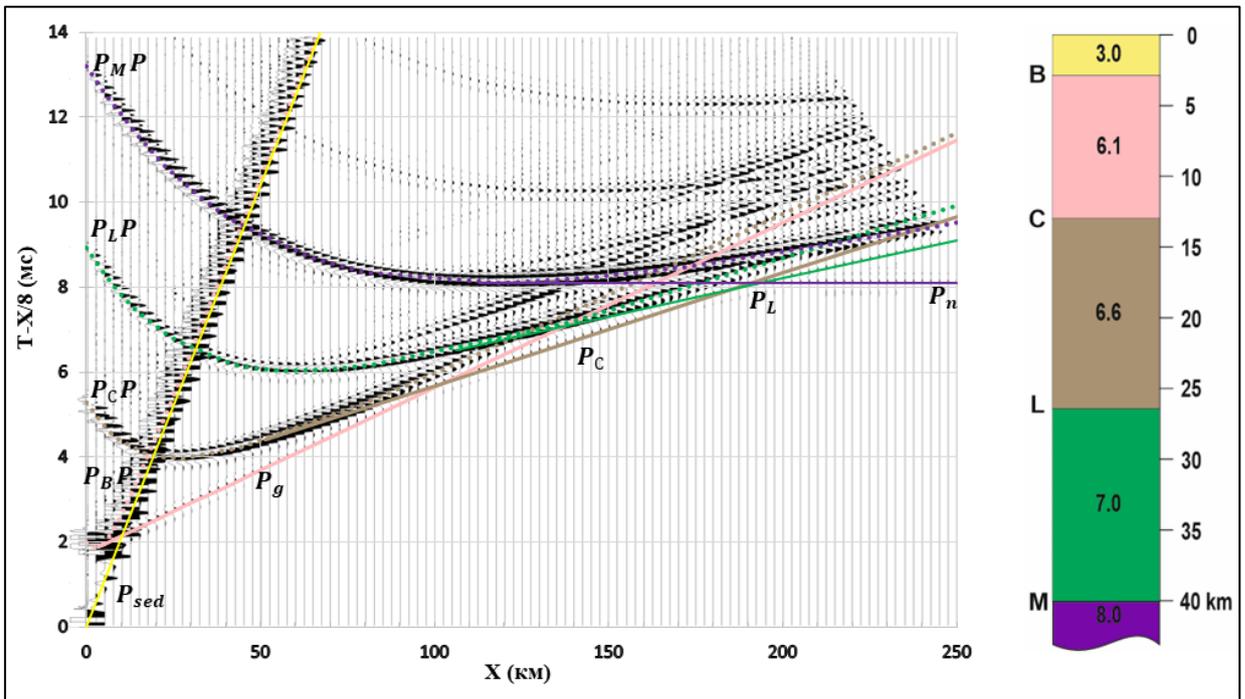


Рисунок 3. Волновое поле для континентального типа коры.

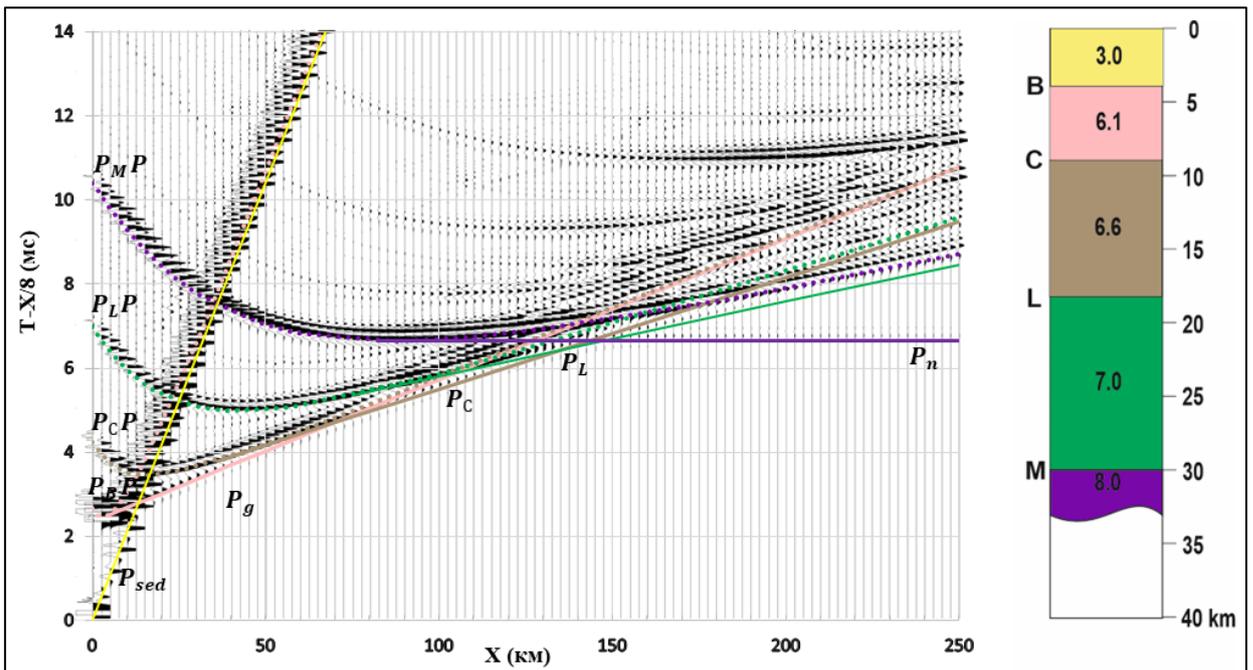


Рисунок 4. Волновое поле для субконтинентального типа коры.

Далее волна P_g сменяется преломлённой волной P_c , связанной со средней корой, кажущаяся скорость которой составляет 6.6 км/с. Амплитуды волн уменьшаются с расстоянием по экспоненциальному закону, что приводит к небольшому разрыву во времени осей синфазностей волн P_g и P_c . Из-за небольшой разницы значений в кажущихся скоростях несколько затруднено разделение этих волн.

Волна P_L от границы кровли нижней консолидированной коры имеют кажущуюся скорость 7 км/с и прослеживается в первых вступлениях на удалениях 170-200 км. Динамические характеристики волны намного слабее чем у волн, связанных с верхней и средней консолидированной корой.

Отражённые волны P_cP и P_LP , связанные с границами средней и нижней консолидированной коры динамически менее выражены, чем отражённая волна P_{VP} .

Интенсивность волны P_{MP} , отражённой от границы Мохо, в докритической и в закритической областях намного превышает интенсивность других волн. В закритической области кажущаяся скорость близится к скорости в нижней коре, т.е. годограф отражённой волны P_{MP} асимптотически стремится к годографу преломлённой волны P_L . Прослеживание волны P_{MP} обеспечивает определение мощности земной коры. При значительной её протяженности волны P_{MP} можно оценить максимальные значения скоростей в нижней части консолидированной коры. (Кашубин, 2011).

Преломлённая волна P_n от границы Мохо со кажущейся скоростью 8 км/с появляется на удалениях 170 км в первых вступлениях. Динамическая выразительность волны является очень слабой.

Волновое поле для модели континентальной коры с границей $M1$ внутри мантии, расположенной ниже границы Мохо на 10 км, представлено на рисунке 5. Отражённая волна от границы $M1$ динамически выражена в докритической и закритической областях. На больших удалениях от источника близка по кинематике волне P_n , которая отличается от последней большей интенсивностью. Она позволяет оценить не только глубину залегания отражающей границы $M1$, но и максимальные значения скоростей верхней мантии. Такая картина наблюдается на реальных сейсмограммах (рис.6), где отражённая волна P_{M1P} асимптотически приближается к преломлённой волне P_n , что и объясняет сильную интенсивность волны в данном интервале.

Волновое поле **субконтинентальной коры** (см. рис.4) отличается от волнового поля континентальной коры разными интервалами прослеживания волн. Это связано с меньшей мощностью каждого слоя субконтинентальной коры.

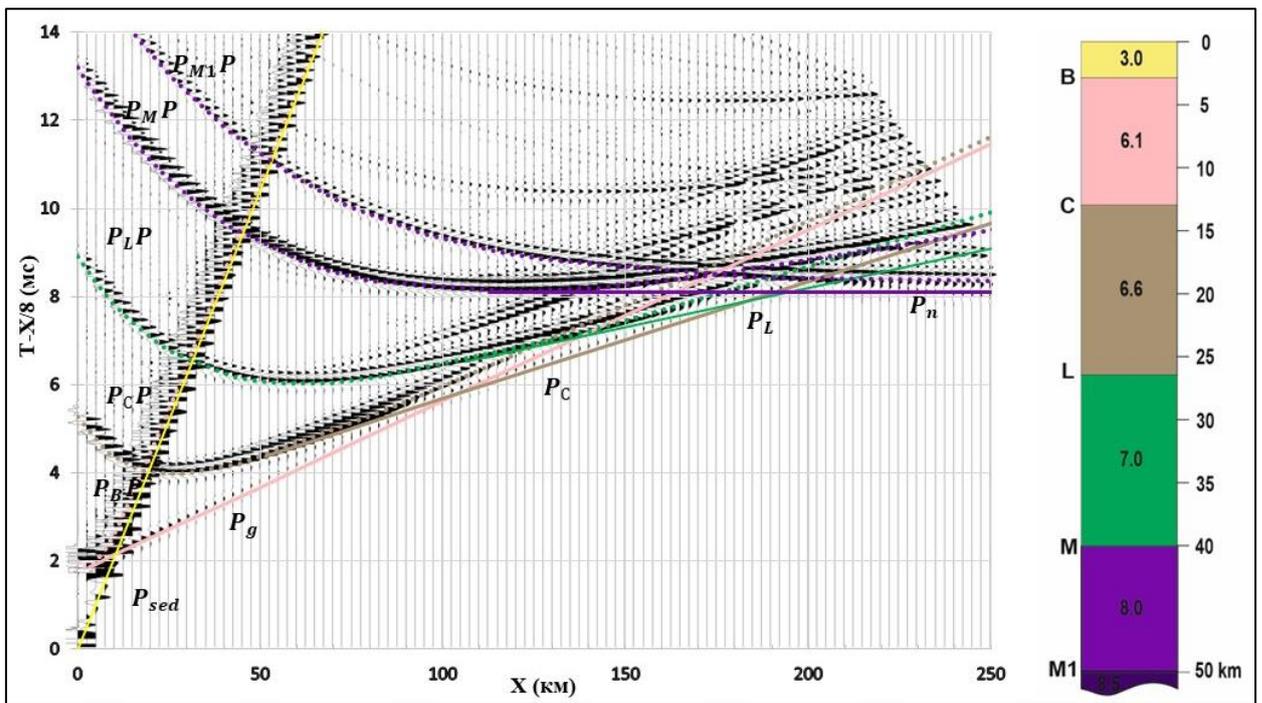


Рисунок 5. Волновое поле для континентального типа коры с границей M1.

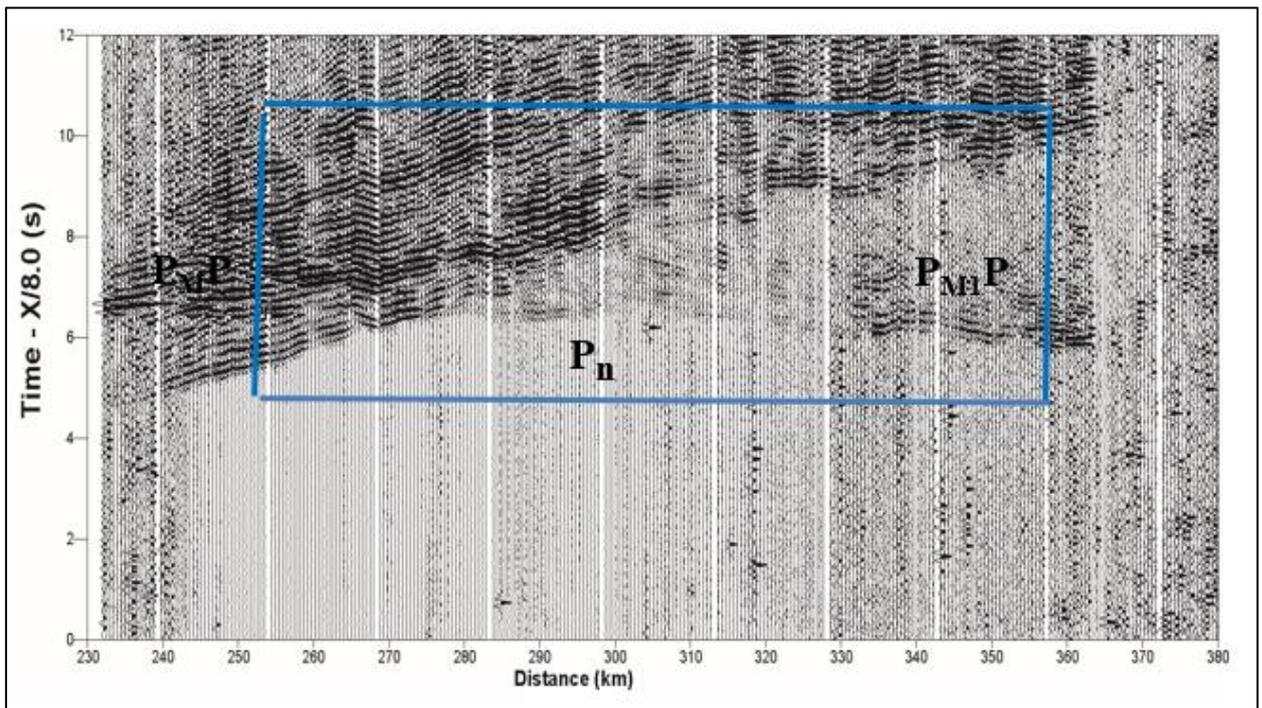


Рисунок 6. Волновое поле опорного профиля ..., Северо-Восточное море.

В волновом поле выделяются динамически выраженные отражённая P_{VP} и преломлённая волна P_g от верхней консолидированной коры с граничной скоростью 6.1 км/с, которая прослеживается в первых вступлениях на удалениях от 5 до 50 км.

Менее интенсивные отражённые волны наблюдаются от границ средней (P_cP) и нижней (P_LP) коры.

Волну P_g последовательно сменяет преломлённая волна P_c , кажущаяся скорость которой составляет 6.6 км/с. Точка излома между волнами P_g и P_c , для этой модели определяется неточно. Преломлённая волна P_L со скоростью 7 км/с практически не видна из-за малой интенсивности и небольшого интервала прослеживания в первых вступлениях.

На интервале удалений 120-150 км динамически выраженной волной в первых вступлениях является отражённая волна P_LP .

Сокращение мощности земной коры до 30 км позволяет прослеживать преломлённую волну P_n в первых вступлениях уже на удалениях 140-150 км. Она имеет кажущуюся скорость 8 км/с. Отражённая волна P_{MP} также имеет большую интенсивность по сравнению с вышеуказанными отражёнными волнами от других границ.

Волновое поле для **океанического типа** (см. рис.7) земной коры более простое, чем волновое поле для континентального типа коры. Мощность коры в рассматриваемой модели составляет 7 км, которая состоит из трех слоев: первый слой – осадочный со средней скоростью 3 км/с, второй – базальты со скоростью 5 км/с, третий – породы типа габбро со средней скоростью распространения продольной волны 6.9 км/с.

В формировании волнового поля океанической коры большее влияние имеют преломлённые волны, чем отражённые. В первых вступлениях на удалениях 1-5 км прослеживается волна P_g от границы верхней консолидированной коры с кажущейся скоростью 5 км/с. Она продолжает прослеживаться во вторых вступлениях после выхода преломлённой волны P_L в первые вступления. Кажущаяся скорость преломлённой волны от нижней консолидированной коры составляет 6.9 км/с. Интервал прослеживания составляет от 5 до 40 км, волна динамически выражена.

Отражённая от границы Мохо волна P_{MP} на больших удалениях стремится к географу преломлённой волны от нижней консолидированной коры. Преломлённые волны P_n регистрируются в первых вступлениях на расстоянии 21 км от источника. Кажущаяся скорость составляет 8 км/с, и волна P_n выражена более динамически более по сравнению с континентальной корой.

Для **субокеанической коры** общей мощностью модели 22 км (рис.8) волновое поле отличается от океанической значениями удалений и времен прослеживания волн.

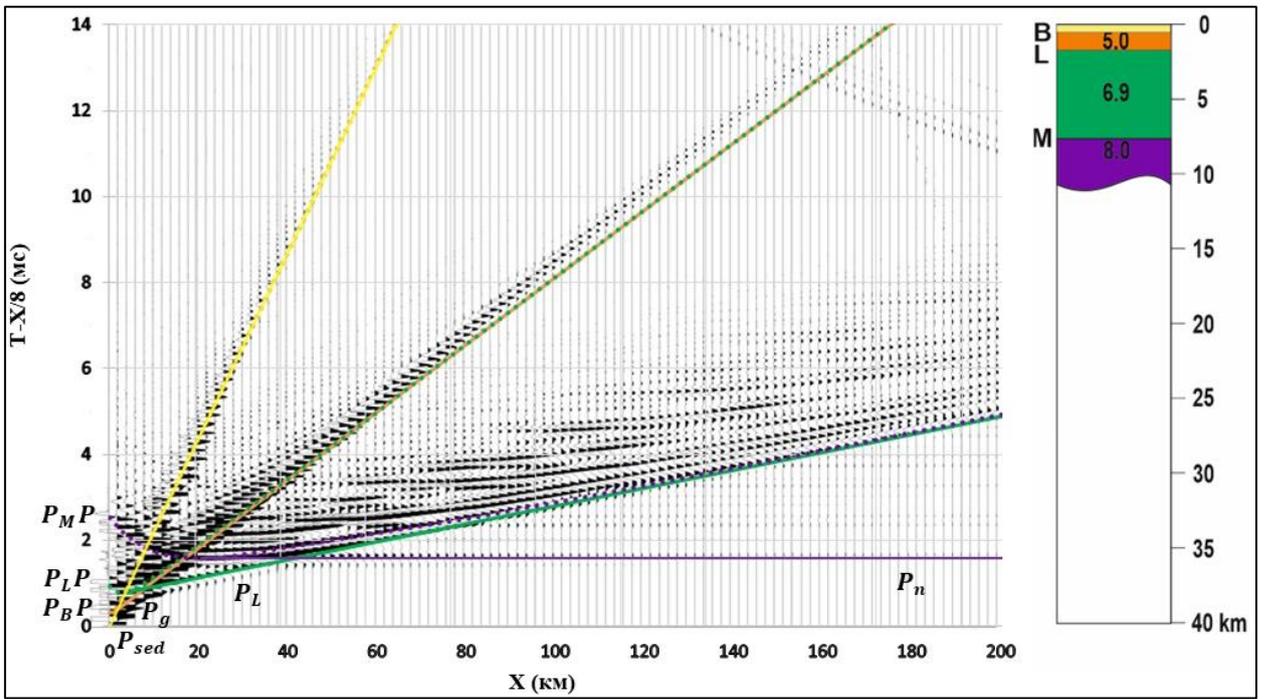


Рисунок 7. Волновое поле океанического типа коры.

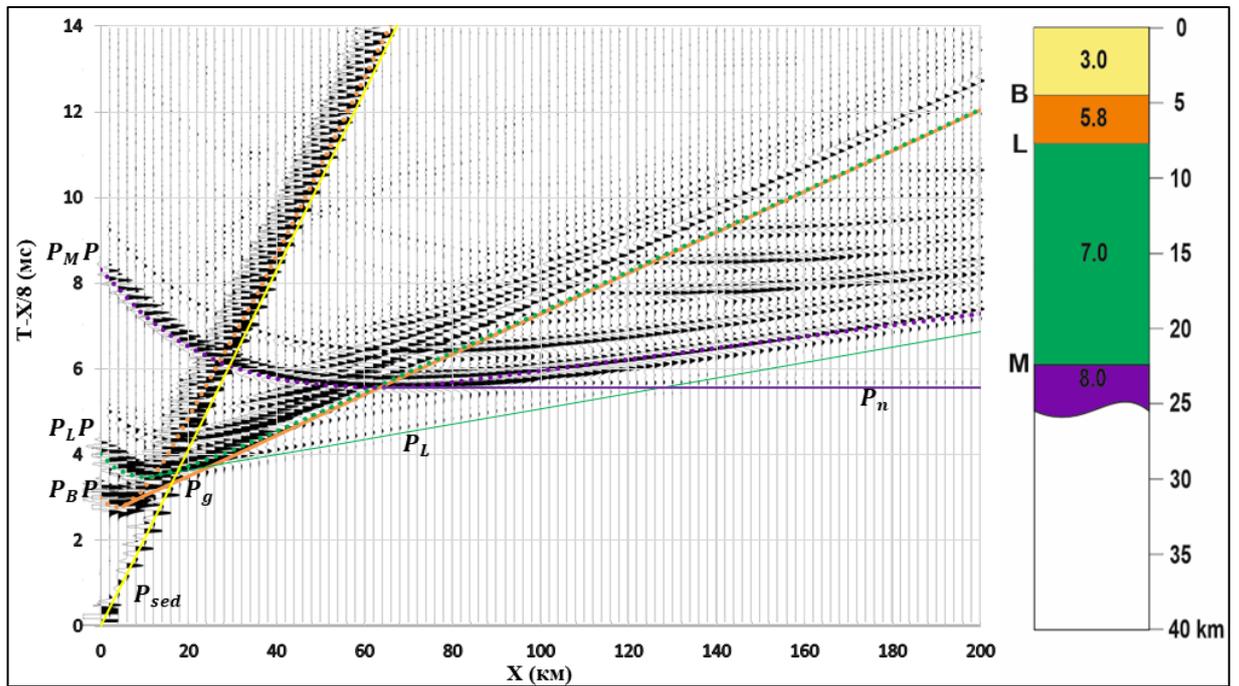


Рисунок 8. Волновое поле субокеанического типа коры.

Характерной чертой для субокеанического типа коры является большая мощность осадочного слоя. В первых вступлениях преломлённая волна P_g от верхней консолидированной коры прослеживается на удалениях от 10 до 20 км с кажущейся скоростью 5.8 км/с.

На смену волне P_g в первые вступления выходит преломлённая волна P_L от нижней консолидированной коры. Кажущаяся скорость составляет 7 км/с. Волна уверенно прослеживается на удалениях от 25 до 100 км.

После неё в первых вступлениях регистрируется волна P_n , которая имеет кажущуюся скорость 8 км/с. Волна динамически выражена слабо, начальная точка находится на удалениях 64 км.

Отражённые волны $P_V P$, $P_L P$ и $P_M P$ динамически сильно выражены, наблюдается высокая интенсивность в критической области.

Как указывалось выше моделирование было выполнено и для слоисто-градиентной модели среды континентального и океанического типа коры. На рисунке 9 отчетлива видна разница между волновыми полями, рассчитанными для слоисто-однородной и слоисто-градиентной моделей. Для слоисто-однородной модели отражённые волны динамически выражены в докритической области, а преломлённые волны быстро затухают. Для слоисто-градиентной модели в первых вступлениях прослеживаются преломлённо-рефрагированные волны, поэтому они являются более интенсивными; отраженные волны в докритической области являются выражены намного слабее.

Несмотря на различие волновых полей для разных районов, выделяются устойчивые главные составляющие поля, которые характерны для определённых структур земной коры. Благодаря этой особенности существует возможность выполнять районирование по типам коры уже на этапе анализа волновых полей.

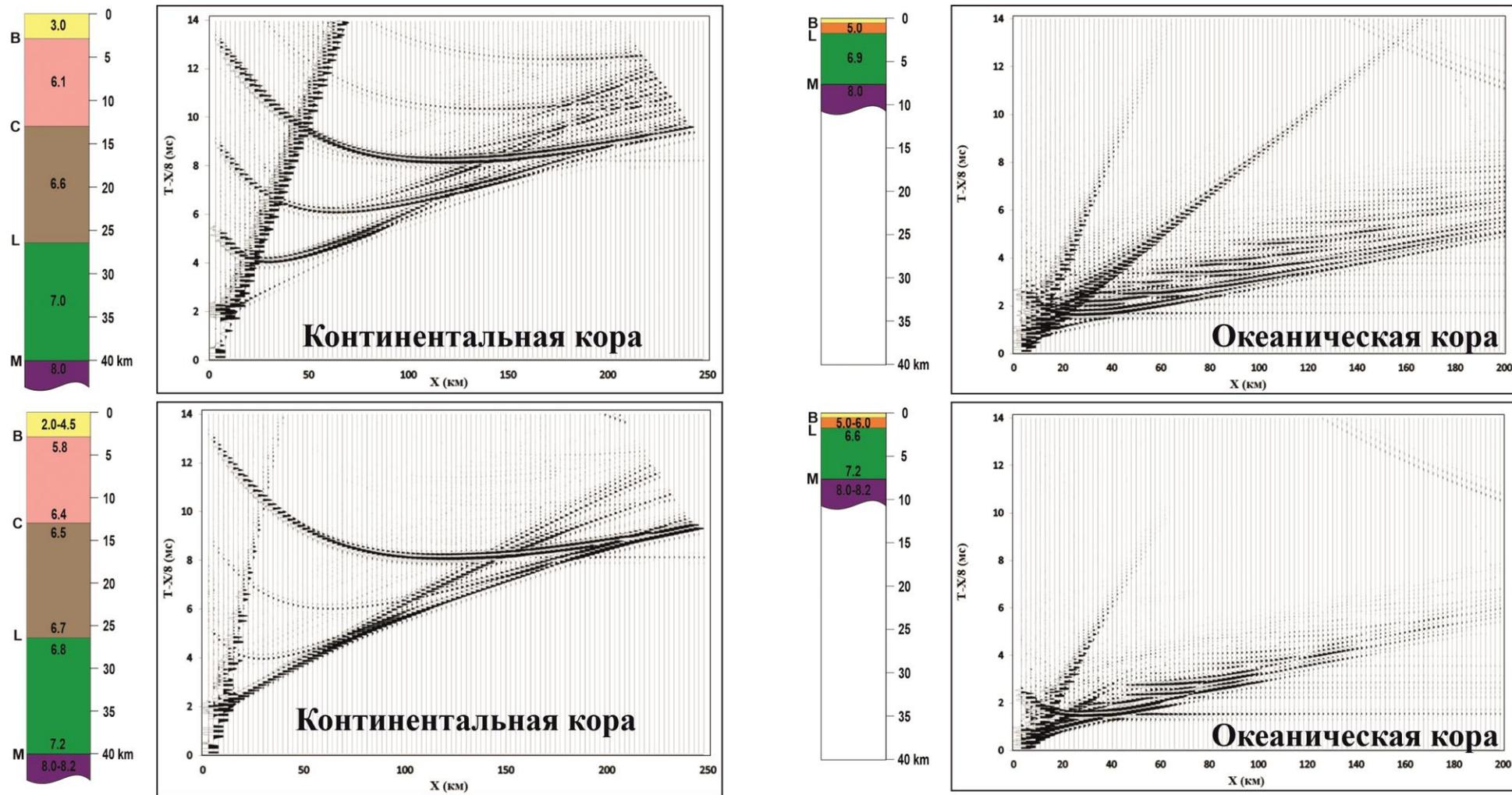


Рисунок 9. Волновые поля континентальной коры и океанической коры для слоисто-однородной и слоисто-градиентной моделей.

ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ В ЗОНЕ ПЕРЕХОДА «КОРА-МАНТИЯ»

Основной опорной границей в структурной сейсмологии с сравнительно стабильными скоростями (7.8-8.2 км/с) является граница Мохоровичича, которая разделяет земную кору и верхи мантии. О геологической природе границы Мохо представлено много гипотез, однако главная мысль основывается на наличие физико-химических процессов, которые приводят к накоплению менее плотных пород выше границы и более плотных – ниже нее. Граница Мохо имеет скоростные неоднородности в зависимости от разных тектонических зон материков и океанов. В области прогибов скорости увеличиваются до значений 8.6 км/с, а в областях океанических хребтов наблюдаются аномально малые скорости 7.6-7.8 км/с, что соответствует коро-мантийной смеси. Различия в скоростных характеристиках границы Мохо свидетельствует о блоковом строении не только земной коры, но и верхов мантии (Резанов, 2002).

Волновые поля, связанные с разделом Мохо, имеют сложный и изменяющийся характер на сейсмограммах ГСЗ: на одних прослеживаются отраженные и преломленные волны, на других – только отраженные, кроме того, изменяется интенсивность этих волн и их соотношение и т. д. Изучение структуры области перехода от коры к мантии представляет интерес для изучения глубинных процессов и природы границы Мохо и в зависимости от динамических характеристик наблюдаемых волн можно делать выводы о типе сейсмической границы.

В данной главе приведены результаты моделирования, которые позволяют понять некоторые особенности преломлённых и отражённых волн, связанных с границей Мохо. Исследования были проведены для ряда моделей, которые отражают особенности перехода от коры к мантии. Синтетические сейсмограммы были рассчитаны для двухслойных моделей с одной границей, ассоциируемой с границей Мохо, в которых учитывались следующие факторы:

- 1) Изменение градиента скоростей в верхнем слое;
- 2) Изменение градиента скоростей в нижнем слое;
- 3) Наличие переходной зоны “кора-мантия” различной мощности;
- 4) Изменение градиента скоростей в переходной зоне.

Ниже представлены результаты этих исследований.

1. Влияние изменения градиента скоростей в верхнем слое на интенсивность рефрагированной волны P_g (рис. 10).

На рисунке 10а задана модель с постоянными скоростями в вышележащем и нижележащем слоях, глубина границы соответствует 20 км.

На рисунке 10б задана модель с градиентом в верхнем слое от 6.5 до 6.7 км/с, остальные параметры остались прежними. Рефрагированная волна динамически более выражена по сравнению с первой моделью.

На рисунке 10в задана модель с бо́льшим градиентом скорости от 6.3 до 6.7 км/с. На волновой картине отмечается увеличение интенсивности рефрагированной волны по сравнению со второй моделью.

Таким образом, при увеличении градиента скорости в верхнем слое интенсивность рефрагированной волны возрастает.

2. Влияние изменения градиента скорости в нижнем слое на интенсивность преломлённо-рефрагированной волны P_n (рис.11).

Было рассмотрено две модели с положительным и отрицательным градиентом скорости.

При положительном градиенте (см. рис. 11б), где скорость изменялась с 8.0 до 8.2 км/с, наблюдается преломлённо-рефрагированная волна. Интенсивность волны возрастает по сравнению со случаем постоянного значения скорости в нижнем слое.

При отрицательном градиенте (см. рис. 11в) с изменением скоростей от 8.0 до 7.8 км/с, наблюдается менее интенсивная преломлённо-рефрагированная волна. Наличие отрицательного градиента в нижнем слое можно связать с наличием теплового потока близкого к границе Мохо. Такая геологическая обстановка характерна для плюмовых провинций.

Таким образом, изменение скорости в нижнем слое влияет на интенсивность преломлённой волны P_n : при наличии положительного градиента скорости в нижнем слое преломлённая волна более интенсивная, а при отрицательном градиенте – менее интенсивная.

3. Влияние наличия переходной зоны на интенсивность отражённой RMP и преломлённой волн P_n (рис. 12).

Переходная зона представлена в виде градиентного слоя, мощность (Δh) которой равна 0 км(а), 1 км (б), 3 км (в), 5 км (г).

Отраженные волны. С появлением переходной зоны наблюдается разделение отражённых волн по времени в докритической области. В модели с мощностью переходной зоны $\Delta h = 1$ км это разделение видно неотчетливо, так как отражённые волны от кровли и подошвы перекрывают друг друга из-за небольшой мощности. Однако при мощности переходной коры $\Delta h = 3$ км наблюдается разрыв этих волн, при нулевом удалении он равен

0.8 с. При мощности переходной зоны $\Delta h = 5$ км разрыв по времени при нулевом удалении составляет 1.5 с.

Таким образом, при увеличении мощности переходной зоны отражённые волны от её кровли и подошвы разделяются по времени и в зависимости от градиента скорости изменяется их интенсивность (в представленных моделях с увеличением мощности переходной зоны градиент скорости в ней уменьшается).

Следует обратить внимание на образование отражённых волн от кровли и подошвы переходного слоя при отсутствии на этих границах скачка скоростей, но при изменении градиента скорости.

Преломлённые волны. В докритической области можно наблюдать изменение интенсивности преломлённой волны от границы Мохо. Из рисунка видно, что интенсивность преломлённой волны увеличивается с уменьшением градиента скорости в переходной зоне, что увеличивает интервал более надёжного выделения этой волны в первых вступлениях.

4. Влияние изменения градиента скоростей в переходной зоне (рис. 13).

В данном случае за основу была взята модель с мощностью переходной зоны $\Delta h = 3$ км (см. рис. 12в). Переходная зона была разделена на три равных части (три слоя) мощностью по 1 км со следующим изменением скоростей в каждом слое: в первом слое скорость изменяется от 6.5 до 6.8 км/с, во втором – от 6.8 до 7.7 км/с, а в третьем – от 7.7 до 8 км/с. То есть в первом и третьем слоях переходной зоны градиент скорости наименьший (одинаковый), а во втором – наибольший.

На рисунке 13 видно, что в первом случае наблюдаются две докритические отражённые волны, соответствующие кровле и подошве переходного слоя; во втором случае – четыре отражённых волны: от подошвы и кровли переходного слоя и двух внутренних границ. Они соответствуют границам, где происходит изменение градиента скорости. Ширина докритической отражённой волны осталась прежней, но изменилась интенсивность волны. «Внутренние» волны интенсивнее «внешних», что связано с бо́льшим градиентом скорости в центральном слое переходной зоны.

Таким образом, при меньшем градиенте скоростей докритическая отражённая волна выделяется слабее, чем при большем.

Полученные результаты моделирования показывают, что по особенностям волнового поля, относящегося к зоне перехода «кора-мантия», можно судить о характере переходной зоны.

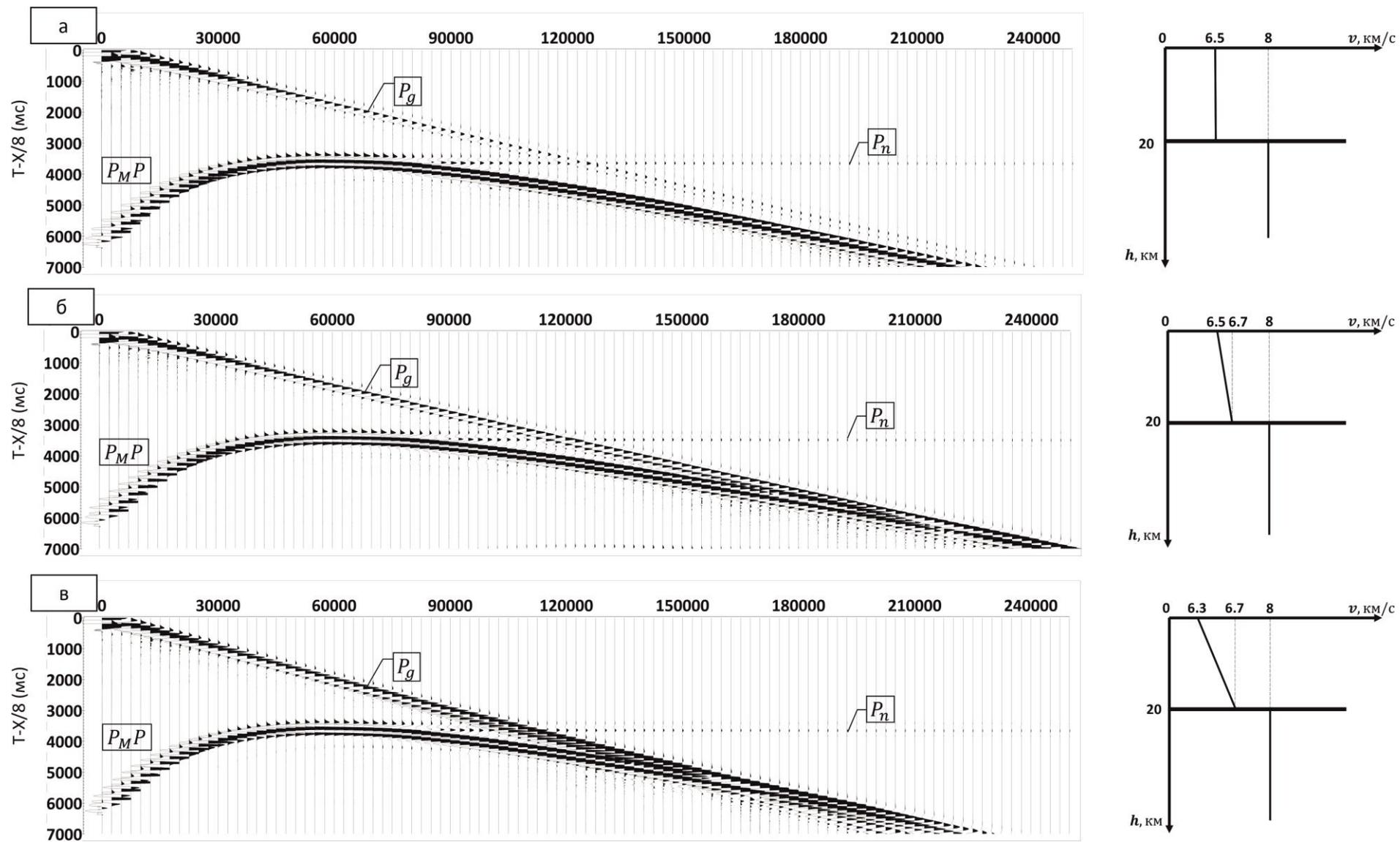


Рисунок 10. Синтетические сейсмограммы при увеличении градиента скорости в верхнем слое.

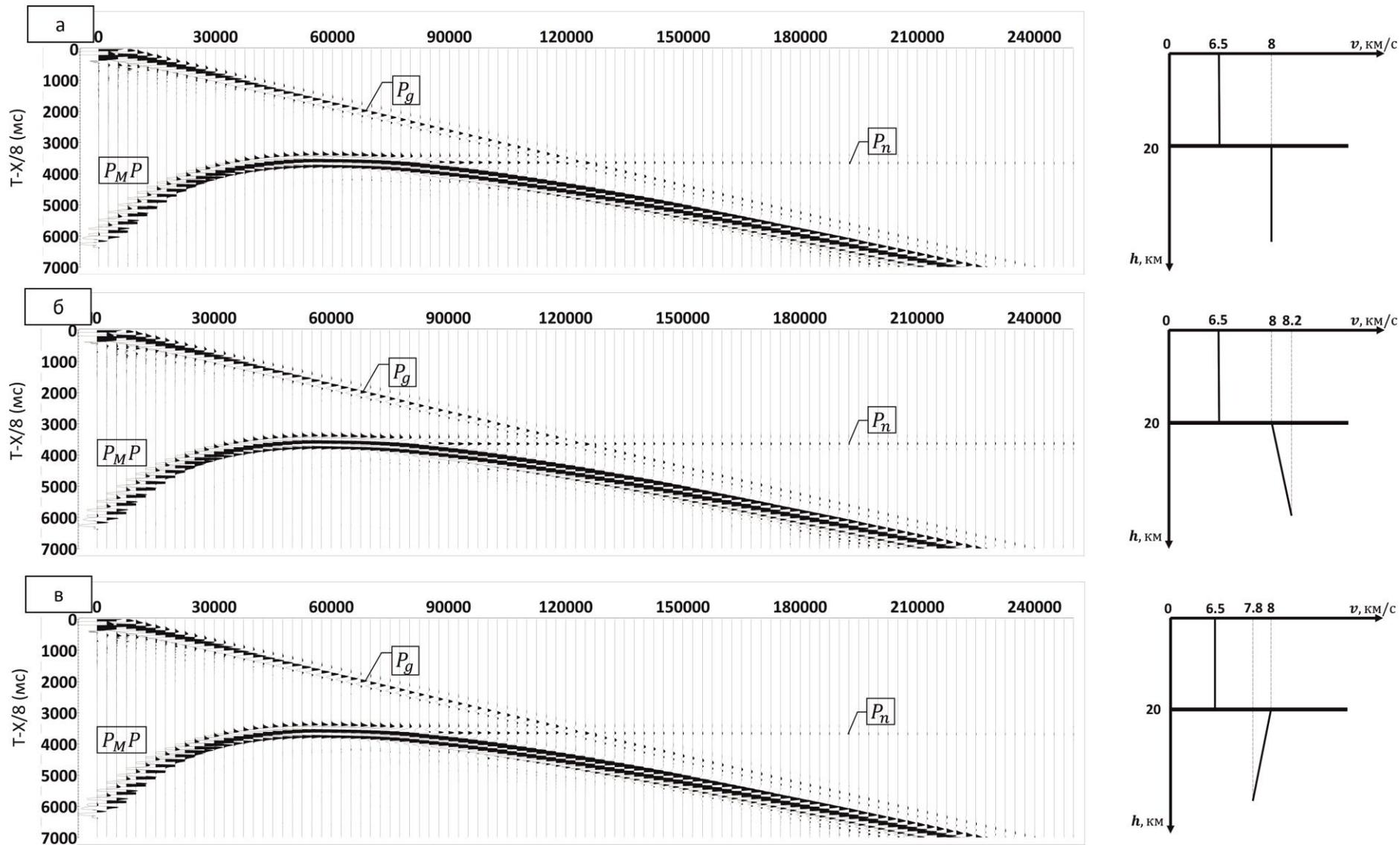


Рисунок 11. Синтетические сейсмограммы при изменении градиента скорости в нижнем слое.

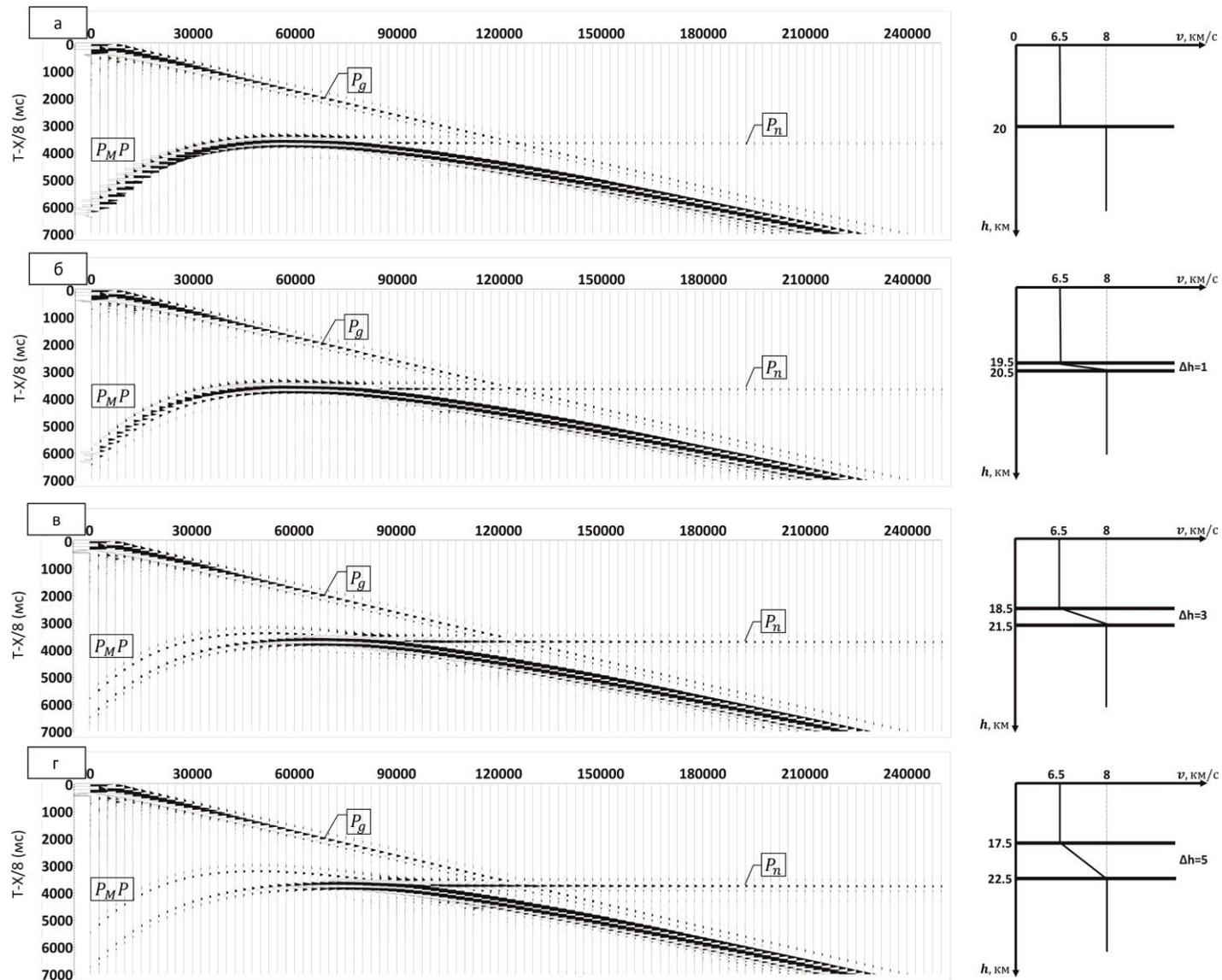


Рисунок 12. Синтетические сейсмограммы при наличии переходной зоны с мощностями 0 км(а), 1 км (б), 3 км (в), 5 км (г).

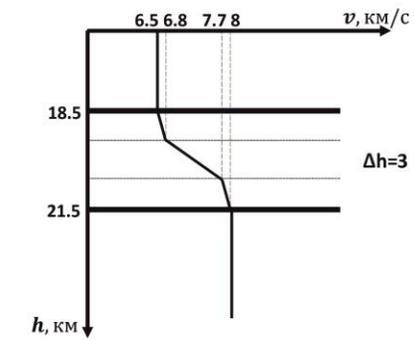
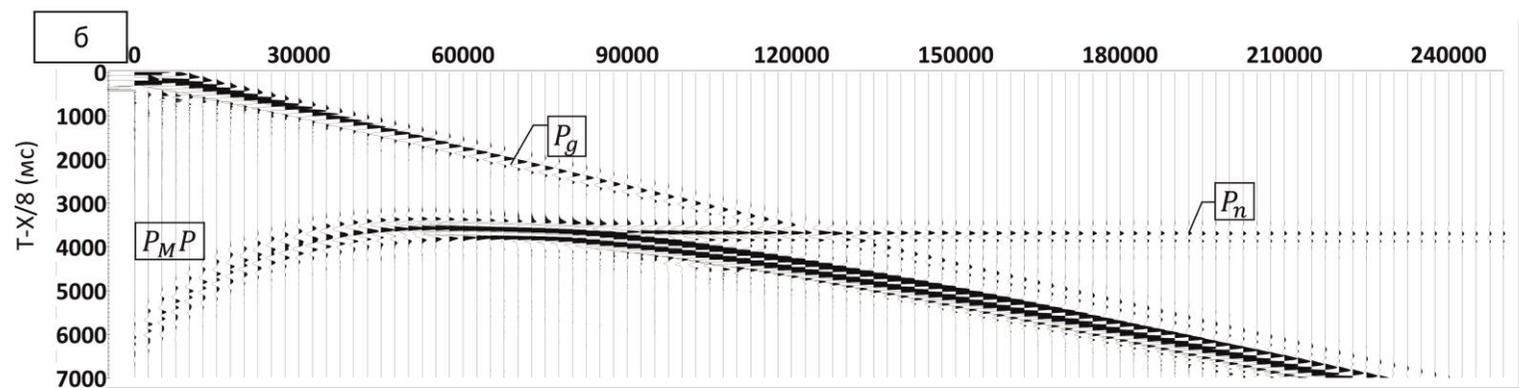
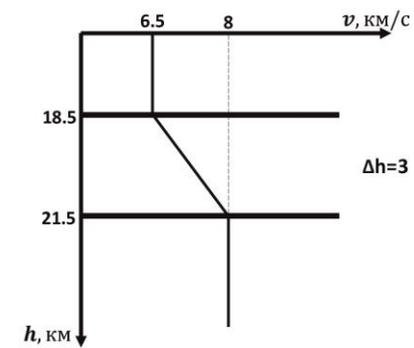
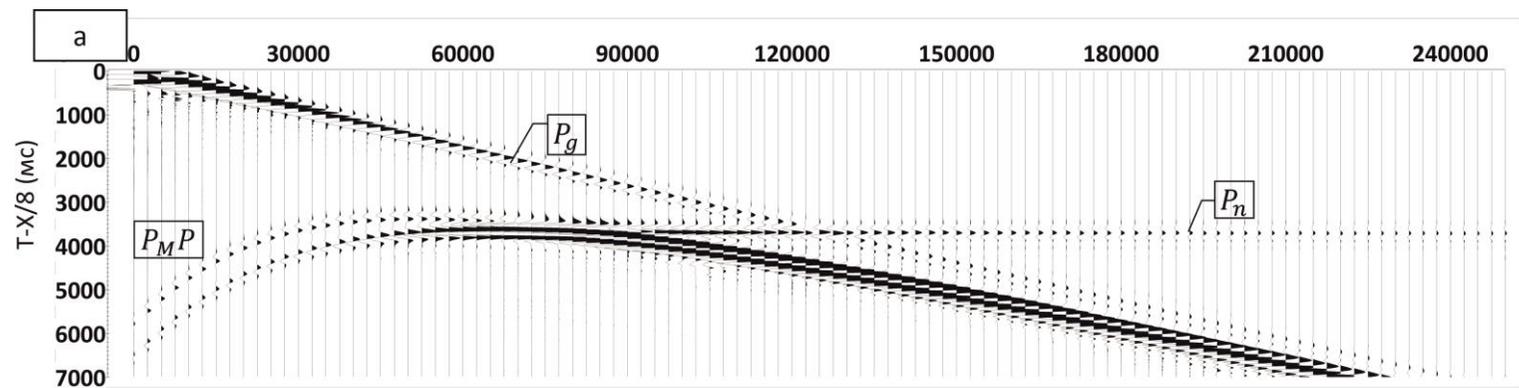


Рисунок 13. Синтетические сейсмограммы при изменении градиента скорости в переходной зоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы были сделаны следующие выводы:

- Выполнена оценка параметров задания сетки моделирования в программе Tesseral- 2D для оптимального соотношения разрешённости сейсмической записи и времени вычислений;
- Выполнено математическое моделирование, иллюстрирующее основные особенности волновых полей для четырёх основных типов земной коры (континентальная, океаническая, субконтинентальная и субокеаническая);
- На основе математического моделирования показано влияние градиента скорости в верхней мантии и наличия переходной зоны «кора-мантия» на динамические особенности отражённой и преломлённой волн от границы Мохо:
 - перепад градиента скорости в верхнем слое приводит к изменению интенсивности рефрагированной волны;
 - изменение градиента скорости в нижнем слое влияет на интенсивность преломлённо-рефрагированных волн;
 - наличие переходной зоны разделяет по времени отражённые волны от её кровли и подошвы и изменяет их интенсивность в зависимости от её мощности и градиента скорости;
 - наличие многофазности докритических отражённых волн может свидетельствовать о сложной структуре переходной зоны, в частности об изменении величины градиента скорости внутри неё.

Выполненное исследование позволяет дать объяснение некоторым особенностям наблюдаемых волновых картин, относящиеся к зоне перехода «кора-мантия». Полученные результаты могут быть использованы при анализе сейсмических данных ГСЗ.

Автор выражает благодарность научному руководителю Сакулине Тамаре Сергеевне за поддержку и консультации в написании выпускной квалификационной работы, а также сотрудникам отдела глубинных геофизических исследований ФГБУ «ВСЕГЕИ» за помощь на разных этапах работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глубинное строение территории СССР / Отв. ред. В.В.Белоусов, Н.И.Павленкова, Г.И. Квятковская. – М.: Наука, 1991. – 224 с.
2. Давыдова Н.И. Изучение тонкой структуры области перехода от коры к мантии. М.: Наука, 1977, 163 с.
3. Кашубин С. Н., Сакулина Т. С., Павленкова Н. И., Лукашин Ю. П. Особенности волновых полей продольных и поперечных волн при глубинных сейсмических исследованиях на акваториях // Технологии сейсморазведки. –2011. –№ 4. –С. 88–102.
4. Кашубин С.Н., Павленкова Н.И., Петров О.В. и др. Типы земной коры Циркумполярной Арктики //Регион. геология и металлогения. 2013. №55. – С. 5-20.
5. Косминская И.П. Метод глубинного сейсмического зондирования земной коры и верхов мантии. Развитие основ метода. М.: Наука, 1968. 227 с.
6. Павленкова Н.И. Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками. М.:Наука, 1981.
7. Павленкова Н.И., Кашубин С.Н., Гонтовая Л.И., Павленкова Г.А. Глубинное строение и геодинамика Охотоморского региона // Регион. геология и металлогения. 2018. №76. С. 70-82.
8. Резанов И.А. Эволюция представлений о земной коре // Рос. акад. наук. Ин-т истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. - М.: Наука, 2002. 299 с.
9. K. R. Kelly, R. W. Ward, Sven Treitel, and R. M. Alford, (1976), "SYNTHETIC SEISMOGRAMS: A FINITE -DIFFERENCE APPROACH", GEOPHYSICS 41: 2-27.
<https://doi.org/10.1190/1.1440605>
10. SeisPro URL: <https://xn--e1aipdfcc.xn--p1ai/>
11. Tesseral-2D URL: www.tesseral-geo.com