

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ ГЕОСФЕР

На правах рукописи

Низкоус Ирина Викторовна

**ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ КАМЧАТСКОГО  
РЕГИОНА С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ**

Специальность 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков  
полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2005

Работа выполнена в Институте динамики геосфер  
Российской Академии Наук

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук

И.А. Санина

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук

А.Д. Завьялов

кандидат физико-математических наук

В.Б. Смирнов

**Ведущая организация:**

Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения  
Российской Академии Наук (ИВиС ДВО РАН)

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов на  
заседании Диссертационного Совета Д.002.050.01 Институте динамики  
геосфер Российской Академии Наук (ИДГ РАН) по адресу:  
119334, г. Москва, Ленинский проспект, 38, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДГ РАН.

Автореферат разослан \_\_\_\_ сентября 2005 г.

Ученый секретарь

Диссертационного Совета Д.002.050.01

кандидат физико-математических наук

В.А. Рыбаков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Исследование переходных зон океан-континент неразрывно связано с решением фундаментальных и практических задач геофизики и геологии.

К фундаментальным задачам относится изучение структуры переходных зон, оценка мощности и скоростных свойств коры, выявление характерных особенностей строения верхней мантии, связь аномалий геофизических полей с физическими параметрами Земли и тектоникой, иными словами, признаки происходящего в регионе глобального геодинамического процесса. К таким признакам также можно отнести вулканическую активность и связанные с ней основополагающие проблемы магмогенерации и механизма питания вулканов, расположения и строения магматических камер.

Практические задачи связаны с повышением точности определения координат землетрясений и мониторингом сейсмической и вулканической опасности.

В частности, изучение Камчатки и Курильской островной дуги, которые являются активной переходной зоной океан-континент, затрагивает все перечисленные фундаментальные и прикладные задачи, и, кроме того, необходимо добавить, что для Камчатки чрезвычайно актуальна проблема поисков гидротермальных месторождений – источников тепловой энергии.

Детальное исследование и построение интегрированной геолого-геофизической модели Камчатской переходной зоны океан-континент требует построения объемных распределений скоростей упругих волн в среде, что возможно с использованием метода сейсмической томографии.

**Цель работы.** Построение детальной пространственной модели распределения скоростей P- и S-волн для Камчатского региона на основе данных первых вступлений P- и S- волн (предоставленных КОМСП ГС РАН) от землетрясений с эпицентрными расстояниями от 10 до 500 км.

**Задачи исследования.** Для выполнения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Отобраны данные о временах пробега сейсмических волн из каталогов КОМСП ГС РАН за 1971-2004 годы.

2. Построены оптимальные одномерные модели для Камчатского полуострова и района Ключевской группы вулканов, переопределены гипоцентры используемых землетрясений.

3. Исследована разрешающая способность для данного взаимного расположения источников и приемников.

4. Рассчитаны пространственные модели распределения скоростей Р- и S- волн для Камчатского региона и района Ключевской группы вулканов.

5. Проведена геофизическая интерпретация полученных расчетных моделей для Камчатского региона и района Ключевской группы вулканов.

**Защищаемые положения.** На защиту выносятся следующие результаты:

1. Оптимальные одномерные модели для полуострова Камчатка и региона Ключевской группы вулканов по Р- и S- волнам.

2. Пространственная модель распределения скоростей Р- и S-волн для Камчатского полуострова и Ключевской группы вулканов.

3. Результаты геофизической интерпретации полученных объемных скоростных моделей для Камчатского полуострова и Ключевской группы вулканов.

**Научная новизна.**

1. Впервые на основе комплекса сейсмологических данных (времен первых вступлений Р- и S-волн от региональных и вулканических землетрясений) КОМСП ГС РАН построена детальная пространственная скоростная модель по Р- и S- волнам с высоким пространственным разрешением для Камчатского региона: размер ячейки параметризации 30х30х20 км.

2. Рассчитаны новые оптимальные одномерные скоростные модели для полуострова Камчатка и для района Ключевской группы вулканов.

3. Установлены характерные особенности сейсмофокальной зоны, взаимосвязь мантийных аномалий скорости с основными тектоническими элементами Камчатки (Восточно-Камчатским вулканическим поясом, Центрально-Камчатской депрессией) и трансформными разломами, а также показано соответствие глубинных коровых и мантийных структур процессам современных поднятий и опусканий.

4. Для Ключевской группы вулканов на основе данных вулканотектонических землетрясений методом сейсмической томографии построена модель распределения скоростей Р- и S-волн с высоким пространственным разрешением: размер блока параметризации 10x10x5 км.

5. Для Ключевской группы вулканов показана связь корового (глубина 5-10 км) и мантийного (глубина 30-40 км) магматических очагов, существование которых предполагалось в результате анализа сейсмичности и данных петрологии и геохимии продуктов извержений.

#### ***Практическая значимость работы.***

1. Построенные одномерные модели могут быть использованы в стандартной процедуре обработки данных КОМСП ГС РАН для определений местоположения сейсмических событий, так как рассчитанные оптимальные модели обеспечивают минимум невязки теоретического и измеренного времени пробега для всех землетрясений по сравнению с существующей моделью Кузина И.П (1974).

2. Полученное пространственное распределение скоростных неоднородностей может служить основой при разработке объемной геолого-геофизической модели земной коры и верхней мантии, объясняющей современные тектонические процессы Камчатки.

3. Детальность представленного скоростного строения земной коры позволяет внести поправки во времена пробега Р-волн от телесеизмических

событий и использовать эти данные для построения модели мантии до глубин порядка 600 км.

4. Полученные результаты важны не только для изучения строения Курило-Камчатской зоны перехода океан-континент, но и для подобных ей структур, так как механизмы развития активных океанических окраин однотипны.

***Апробация работы и публикации по теме диссертации.***

Результаты работы были представлены на Геофизических чтениях им. Федынского (г. Москва, Россия, 2003, 2004), на Объединенной Ассамблее Европейского Геофизического Общества, Американского Геофизического Союза и Европейского Союза наук о Земле, (г. Ницца, Франция, 2003), на I Генеральной Ассамблее Европейского Союза наук о Земле (г. Ницца, Франция, 2004), на IV международном совещании «Взаимосвязь между тектоникой, сейсмичностью, магмообразованием и извержениями вулканов в вулканических дугах» (г.Петропавловск-Камчатский, Россия, 2004), на XXIX Генеральной Ассамблее Европейской сейсмологической комиссии (г. Потсдам, Германия, 2004), на Генеральной Ассамблее Европейского союза наук о Земле (г. Вена, Австрия, 2005). По теме диссертации опубликовано 3 статьи и 8 тезисов докладов.

***Благодарности.*** Работа бы не получилась такой, какая она есть, без помощи, участия и заинтересованности многих людей и целых коллективов. Хочется поблагодарить в первую очередь д.ф-м.н.Санину И.А. и академика Адушкина В.В. за идею диссертации и научное руководство.

Автор благодарен сотрудникам КОМСП ГС РАН и ИВиС ДВО РАН за предоставленные данные и ценные рекомендации: Гонтовой Л.И. за постоянную помощь и поддержку, Сенькову С.Л., Бахтияровой Г.М., Чеброву В.Н., Дрознину Д.В. за предоставленное программное обеспечение, Ландеру А.В., Гусеву А.А. за ценные критические и методические замечания.

Особо хочется отметить помощь и искренне поблагодарить зарубежных коллег Эдварда Кисслинга, Ульриха Ашера, Штефана Хьюзена, Сенена Сандовала и всех сотрудников Цюрихского Института Геофизики ЕТН, за поддержку, сотрудничество и проявленный интерес к теме работы, предоставление современных программ, обсуждение результатов и критические замечания. Также хочется поблагодарить за участие и поддержку всех сотрудников Лаборатории сейсмологических методов исследований литосферы ИДГ РАН, Султанова Д.Д., Гамбурцеву Н.Г., Рубинштейн Х.Д., Кузнецова О.П., Усольцеву О.А., Ушакова А.Л., Черных О.А., а также Богоявленскую Г.Е., Орешина С.И., Степанову М.Ю., Китова И.О., Авдейко Г.П., Савельева Д.П., Портнягина М., Горбатова А., Шмидта С.А., Иришкова С.В.

Работа поддерживается грантом РФФИ N 03-05-64650.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, занимает 164 страницы, включая 2 приложения и 60 рисунков. Библиография насчитывает 131 наименование.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** диссертации подробно описана актуальность работы, ее цели и задачи, научная и практическая значимость.

**В первой главе** - «Геофизические исследования полуострова Камчатка» - приводится обзор работ, отражающих развитие и основные результаты геолого-геофизических исследований Камчатского региона.

Сейсмические наблюдения на Камчатке ведутся с 1961 года. Более чем за 40 лет исследований выполнен большой объем сейсмических, в основном профильных исследований глубинного строения полуострова [Балеста, 1981, Аносов и др., 1978, Гонтовая и др., 1990, Славина, Федотов, 1974]. По результатам детального исследования зоны Вадати-Заварицкого-Беньофа, которая чаще называется сейсмофокальной зоной (СФЗ),

Камчатки [Федотов и др., 1985], проведенного на основе каталога региональных камчатских землетрясений за период 1962-1981 годов, были получены следующие данные о форме и ряде свойств фокальной зоны у берегов Камчатки.

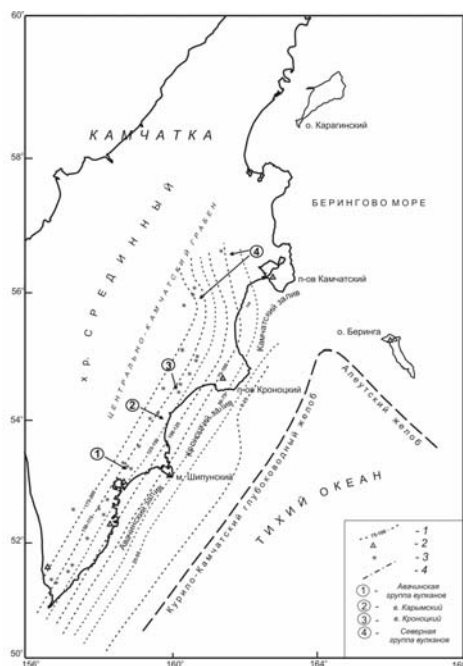


Рис.1. Карта полуострова Камчатка. Условные обозначения: 1 – расположение Тихоокеанской плиты по данным работы [Федотов, Гусев и др., 1985]; 2 – сейсмические станции, 3 – вулканы.

Максимум сейсмичности приходится на диапазон глубин 0-40 км. На глубине 40 км сейсмичность скачком убывает примерно в 10 раз. Фокальная зона на этой глубине сужается почти до 40 километровой ширины, максимальная ширина составляет 50 км. Было установлено, что сейсмофокальный слой падает под континент под постоянным углом  $50^\circ$ . Линия максимальной сейсмичности проходит под восточными полуостровами Камчатки. Нижний край фокальной зоны погружается на глубину от 200 км на севере до 500 км на юге. В месте сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, на глубинах 50-200 км направление простираения СФЗ изменяется – оно поворачивает на угол около  $30^\circ$  к северу, после чего выклинивается.

Результаты исследования механизмов очагов сильных землетрясений ( $M \geq 6$ ) в районах островных дуг Тихого океана выявили единый преобладающий тип механизма очага для землетрясений, расположенных в



верхних 100 км [Балакина, 1959, 1983, 1987, 1992, 1995]. Механизмы очагов глубоких землетрясений, на глубине более 100 км, не являются однотипными. Кроме того, показана связь разломов северо-восточного, северо-западного и субширотного простирания с очагами землетрясений [Балакина, 1995].

При изучении скоростного строения Камчатки методом сейсмической томографии использовались два основных подхода. Первый основывается на минимизации отклонений наблюдаемых времен пробега сейсмических волн от расчетных (например, относительно стандартного годографа) за счет уточнения модели среды [Кузин, 1974, Болдырев 1982, Gorbатов et al., 1997, 1999, 2000, Николаев, Санина, 1982, Попова и др. 1993, Smaglichenko et al., 2003, Гонтовая и др., 1995]. Второй подход состоит в использовании разности времен пробега от источников до станции от групп близкорасположенных событий [Славина, Федотов 1974, Славина и др., 2004, Slavina, Pivovarova, 1992].

Мнения авторов относительно структуры СФЗ расходятся: она может трактоваться как достаточно однородная зона [Gorbатов et al., 1999] или область со структурными неоднородностями, обусловленными различными причинами [Engdahl et al., 1995, Кузин, 1998, Ito et al., 2000, Степанова, 2004].

***Во второй главе*** – «Построение одномерной модели распределения скоростей Р- и S-волн для полуострова Камчатка» - представлен первый этап расчета пространственной модели распределения скоростей упругих волн в коре и верхней мантии Камчатки – отбор данных и определение опорной одномерной модели.

Для вычислений использовался каталог локальных землетрясений, любезно предоставленный Камчатской Опытно-методической сейсмологической партией Геофизической службы РАН (КОМСП ГС РАН) за период с 1971 по 2003 год. В обработку были приняты только фазы IP, IS,

EP и ES, точность определения которых по каталогу для IP составляет 0.1 с, для EP и IS – 0.2 с, для ES – 0.3 с. Для обработки было выбрано 6702 локальных события, общее число фаз сейсмических волн составило 96469, из них 63515 фаз P-волн и 32954 фаз S-волн. Отбор событий проводился по следующим критериям: для каждого их них не менее 8 четких записей P-волн на сети станций (1), азимутальный охват меньше 180 градусов (2), ошибка определения времени вступления должна составлять менее  $\pm 0.2$  с (3). Вычисления проводились с использованием программы VELEST [Kissling 1988; Kissling et al. 1994], написанной на языке FORTRAN. Построенная с ее помощью оптимальная модель, которая включает в себя станционные поправки, обладает следующими свойствами:

1. Скорости в каждом слое есть взвешенное среднее значение скоростей на данной глубине.
2. Определение положений всех землетрясений в области расположения станций происходит с одинаковой точностью.

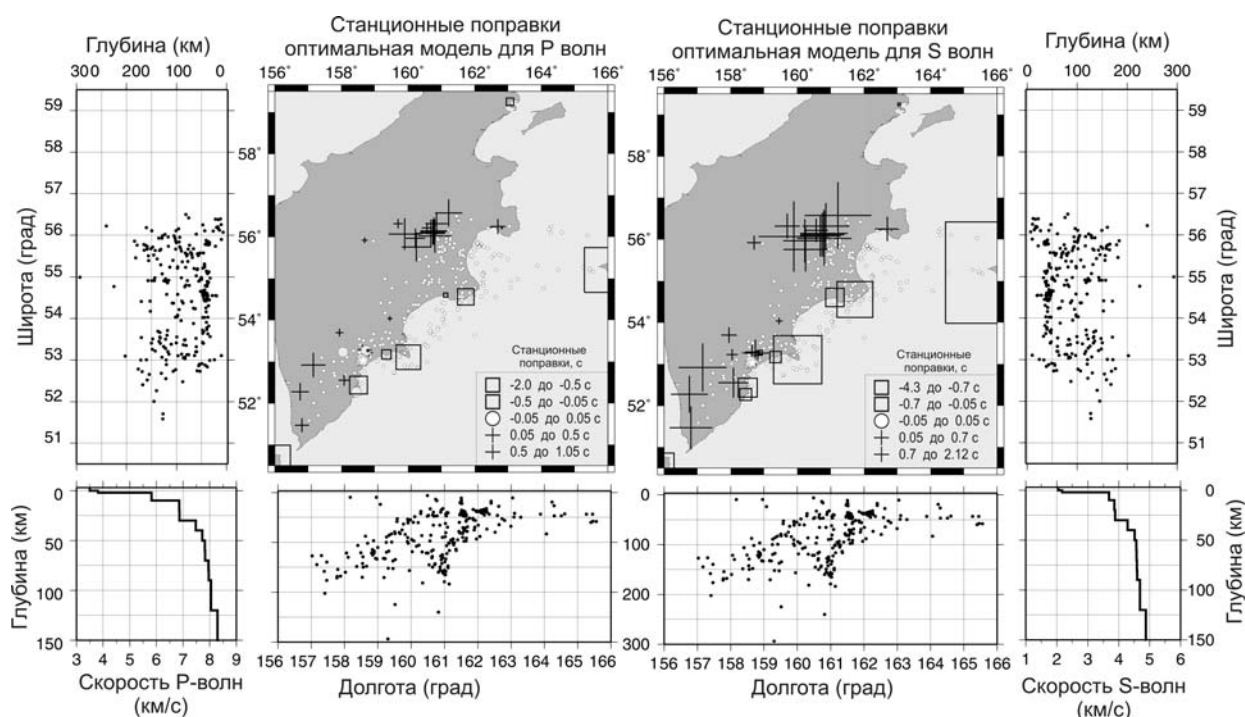


Рис. 2. Оптимальные одномерные модели распределения скоростей S-волн (справа), и P-волн (слева), показаны эпицентры землетрясений, станционные поправки и проекции гипоцентров на вертикальные плоскости. Звездочкой обозначена опорная станция Петропавловск (PET).

3. Одномерная модель вместе со стационарными поправками отражает основные особенности геологического строения приповерхностных слоев исследуемого региона.

Сам термин «оптимальная» указывает на тот факт, что одномерная модель и стационарные поправки дают минимальное среднее значение среднеквадратичной ошибки (RMS) времени пробега для всех землетрясений, используемых в расчетах.

Рассчитаны и протестированы модели, построенные на основе данных времен пробега Р-волн, S-волн и с использованием объединенного набора данных по Р- и S-волнам. По результатам тестов, найденные модели являются оптимальными для Камчатского региона. Модель, рассчитанная по данным Р- и S-волн в дальнейшем используется для расчетов пространственной скоростной модели. Необходимо отметить, что оптимальная модель отличается от используемой в настоящее время для локации землетрясений модели И.П. Кузина, является более подробной и лучше отражает особенности геологической структуры региона.

***В третьей главе*** – «Построение объемной модели распределения скоростей сейсмических волн для полуострова Камчатка» - представлен второй этап расчета пространственной томографической модели полуострова Камчатка – моделирование трехмерного распределения скоростей сейсмических волн для коры и верхней мантии на основе данных времен пробега Р- и S- волн от локальных землетрясений.

Используя найденную оптимальную одномерную модель и стационарные поправки, были пересчитаны положения всех землетрясений из регионального каталога КОМСП ГС РАН за 1971-2003 гг., удовлетворяющих упомянутым выше критериям отбора. Смещение гипоцентров в плоскости ХУ составило менее 10 км в основном в северо-западном направлении, по глубине положение землетрясений изменилось не

более чем на 15 км. Вычисления проводились с помощью программы SIMULPS14 [Haslinger, 1999, Thurber, 1983; Um, Thurber, 1987; Evans et. al., 1994; Thurber, Eberhart-Phillips, 1999].

Перед расчетами был выбран метод параметризации, проведена оценка разрешающей способности и тестирование на основе синтетических данных для оценки пространственного разрешения и настройки программных контрольных параметров.

После проведения серии тестов, в качестве оптимальной была выбрана следующая параметризация среды – прямоугольные блоки с длиной ребер 30 км x 30 км x 20 км. Для двух приповерхностных слоев модели размер ячеек был выбран равным 30 км x 30 км x 10 км, то есть высота блока уменьшена в 2 раза. Это сделано для того, чтобы избежать чрезмерного сглаживания и усреднения значений скоростей внутри каждого блока, так как структура верхних слоев коры более сложная с геологической точки зрения. Глубже 20 км используются «стандартные» блоки высотой 20 км.

Существует несколько стандартных способов оценки разрешающей способности томографической задачи: 1) подсчет числа лучей, пересекающих каждый блок модели (*hit matrix* - матрица распределения лучей); 2) вычисление взвешенной суммарной длины луча в каждом блоке (*Derivative Weighted Sum*, или *DWS*); 3) оценка диагональных элементов матрицы разрешающей способности для данной конфигурации источников и приемников (*Resolution Diagonal Element*, или *RDE*).

Особенности каждого метода подробно описаны в публикации [Kissling, 1988]. В связи с тем, что упомянутая работа была одной из первых в этой области, в научной литературе используются английские варианты названий методов оценки разрешающей способности.

Все три способа дают похожие результаты, хотя более показательны оценки с помощью *DWS* и *RDE*. Так, для Камчатки, на основе всех трех методов оценки разрешающей способности установлено, что область с

максимальной разрешающей способностью располагается на глубинах 40 – 100 км под восточным побережьем Камчатки, простираясь на запад до Срединного хребта. В этом интервале глубин ожидается получить наиболее точные оценки значений скоростей сейсмических волн. Глубже 120 км область хорошей и удовлетворительной разрешающей способности уменьшается по площади и смещается на запад в сторону Центрально-Камчатской депрессии.

Кроме оценок разрешающей способности было проведено тестирование на основе синтетических данных. Набор синтетических данных был получен следующим образом. При том же расположении источников и приемников, что и в реальных данных, составляют модель распределения положительных и отрицательных скоростных аномалий в коре (интенсивностью 10-15%) и мантии (интенсивностью 5-8%); решают прямую задачу для этой модели и к полученным временам пробега добавляют белый шум. В работе использовался шум, имеющий Гауссовское распределение со средним значением равным нулю и стандартным отклонением  $\sigma=0.1$  с.

Рассчитанные таким образом синтетические данные обращают, причем в качестве исходной берется однородная одномерная модель. Это позволяет определить насколько хорошо восстанавливается амплитуда и расположение скоростных аномалий. Изменение управляющих программных параметров в процессе тестов позволяет определить оптимальную комбинацию коэффициентов демпфирования для данного расположения источников и приемников.

По результатам синтетических тестов был сделан вывод, что все аномалии (их формы и амплитуды) были достаточно хорошо реконструированы; во всех слоях наблюдается эффект «перетекания» аномалий в следующий, более глубокий слой; модельные аномалии различимы на фоне артефактов скорости. Все это дало основание

использовать выбранные контрольные параметры для расчета пространственной модели по реальным данным времен пробега Р- и S-волн.

В процессе вычислений на основе реальных данных RMS уменьшилась с 0.58 с до 0.47 с. Результаты расчетов представлены в виде горизонтальных и вертикальных сечений пространственной модели. На профили и горизонтальные разрезы спроецированы землетрясения из полосы  $\pm 10$  км для всех сечений.

Вертикальные сечения модели выбраны следующим образом. Три профиля вдоль простирания Камчатки: первый – в акватории восточных заливов по оси максимальной сейсмичности, второй – вдоль Восточного вулканического пояса и третий – вдоль Центрально-Камчатской депрессии. Пять профилей заданы вкост СФЗ и пересекают Мутновско-Гореловскую и Авачинско-Корякскую группы вулканов, Карымский вулканический центр, активные вулканы Кроноцкий и Кизимен, Северную группу вулканов. Севернее, в районе вулкана Шивелуч, данных уже не достаточно, поэтому сечения модели в этой зоне не рассчитывались. Горизонтальные сечения модели были сделаны по границам слоев, определенных в процессе параметризации среды.

На основе анализа полученных результатов моделирования по серии вертикальных сечений установлено:

1. Скоростная структура земной коры и верхней мантии Камчатского региона значительно расслоена, при этом характер этой расслоенности изменяется по направлению простирания сейсмофокальной зоны и основных тектонических структур полуострова.

2. Литосфера Восточной Камчатки вкост простирания переходной зоны океан-континент характеризуется значительной неоднородностью и это в равной степени касается всей области субдукции – континентального блока и океанической плиты. Показано, что в большинстве случаев те и другие скоростные неоднородности взаимосвязаны и контролируются изменением уровня сейсмичности на разных глубинах.

3. Впервые в верхней мантии Камчатки выявлен астеносферный клин (на глубине 80-120 км), который прослеживается под Восточно-Камчатским вулканическим поясом, и скоростная структура которого четко увязывается с глубинной и приповерхностной тектоникой. Очевидно, что с этим мантийным слоем связано магмопитание активных вулканов, и его свойства определяют характер глубинной сейсмичности.

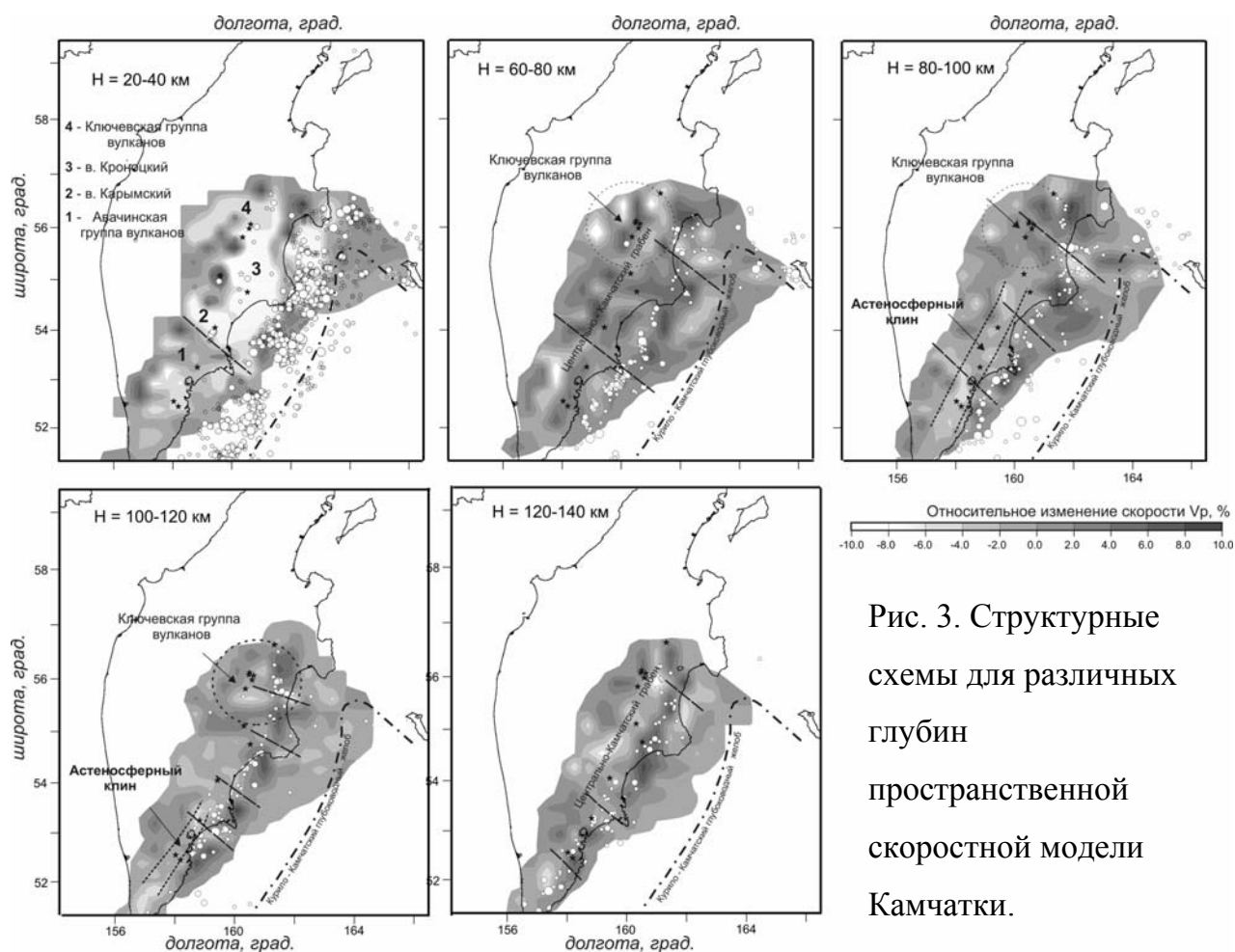


Рис. 3. Структурные схемы для различных глубин пространственной скоростной модели Камчатки.

4. Выявлена наклонная высокоскоростная аномалия, интерпретируемая как Тихоокеанская плита. Угол ее наклона изменяется вдоль Камчатки – от примерно  $50^\circ$  на юго-западе до  $20^\circ$  (не более) на северо-востоке. Область максимальной сейсмичности проходит по верхней границе предполагаемой плиты. Она характеризуется значительной скоростной неоднородностью и расслоенностью. При этом скоростные неоднородности в области астеносферного клина продолжают и в зону

плиты, что может говорить о единстве физического состояния вещества мантии на данной глубине. Абсолютные значения скорости в пределах плиты также изменяются; они более высокие в области сочленения островных дуг, что, возможно, является следствием высоких глубинных напряжений.

5. В целом по характеру скоростной структуры Камчатку можно разделить на три части – южную, среднюю и северную, которые при определенном сходстве, обусловленном их приуроченностью к зоне перехода океан-континент, имеют целый ряд индивидуальных отличий. Представляется, что наиболее ярким из этих отличий является обнаруженная в верхней мантии на глубине около 150 км под Центральной Камчаткой интенсивная практически асейсмичная низкоскоростная аномалия, которая, вероятно, имеет связь с приповерхностными структурами, в частности Центрально-Камчатской депрессией.

На основе анализа горизонтальных сечений установлено:

1. Наиболее крупные разломы северо-западного простирания разделяют литосферу Восточной Камчатки на блоки, которые условно назовем южным, средним и северным. Согласно существующей схеме разломной тектоники полуострова [например, Селиверстов, 1998] выявленный глубинный разлом в районе Авачинского залива, очевидно, соответствует зоне Малкинско-Петропавловских поперечных дислокаций, в районе Кроноцкого полуострова – Кроноцко-Крутогоровской зоне. Эти разломные зоны имеют продолжение в верхнюю мантию на глубину не менее 140 км и являются трансформными (согласно литературным источникам).

2. Разломная зона в Камчатском заливе, имеющая продолжение в континентальном блоке по направлению к Ключевской группе вулканов, впервые установлена в скоростной структуре литосферы. Ее существование подтверждается другими геофизическими данными, в частности МТЗ [Мороз, Нурмухамедов, 2004].



3. Разрывные нарушения в районе Кроноцкого залива прослеживаются на глубинах 40-60 км, 80-120 км и возможно продолжают глубже, до 140 км.

Далее в главе дается общая геофизическая интерпретация результатов томографического моделирования.

Из-за ограниченности данных измерений геофизических параметров для Камчатки, сравнение скоростного строения и геофизических полей можно провести только для южной и северной частей полуострова. Поэтому результаты предшествующих геофизических исследований методами гравиметрии, магнитотеллурических зондирований и измерения теплового потока обобщены и спроецированы на вертикальные сечения построенной пространственной скоростной модели по Р-волнам, проходящие через Авачинско-Корякскую и Ключевскую группу вулканов.

Показано, что повышение электропроводности и температуры приурочены к зонам пониженной скорости на глубинах 80-120 км (астеносферный клин) и 160-180 км (возможный мантийный волновод), расположенным непосредственно под Авачинской группой вулканов. На профиле через Ключевскую группу вулканов выделяется слой повышенной электропроводности на глубине 10-40 км, непосредственно под вулканами (коровая аномалия), и на глубине 100-180 км (мантийная аномалия) [Мороз, Гонтовая, 2001].

Кроме того, по результатам сопоставлений геофизических исследований с глубинным распределением аномалий скорости сейсмических волн, можно показать взаимосвязь определенных геофизических аномалий с конкретными интервалами глубин. Так, высокий тепловой поток, характерный для ЦКД (60 мВт/м<sup>2</sup>), Кроноцкого полуострова и Камчатского залива, благодаря скоростной модели можно привязать к глубинам 120-140 км, где этим областям соответствуют зоны с пониженными значениями скорости Р-волн. Изменение электрического сопротивления в районе Ключевского вулкана, можно связать с

низкоскоростными аномалиями в слоях 20-60 км. Вариации трансформированного гравитационного поля [Зубин и др., 1990] для Ключевской группы вулканов согласуются с картиной распределения высоко- и низкоскоростных аномалий на глубине 40-60 км.

В заключении главы приведены основные геодинамические концепции развития активных переходных зон океан-континент, применяемые для Камчатского региона различными авторами. Это концепция тектоники плит [Авдейко и др., 2001, Зинкевич, 1993, Пущаровский, Меланхолина 1992 Трубицын и др., 1998, Varanov et al., 1991, Валяшко и др., 1993, Федотов и др., 1987, Селиверстов, 1998] и альтернативные ей концепции океанизации Ермакова В.А. [Ермаков, 2002] и гравитационной конвекции [Белоусов, 1989, Кэри, 1991].

Все приведенные гипотезы геодинамического развития зоны перехода континент-океан, и в частности Камчатской активной окраины Тихого океана, опираются на те или иные особенности структуры СФЗ, поэтому детальное исследование фокальной зоны – основополагающее в выяснении механизма геолого-геофизической эволюции региона.

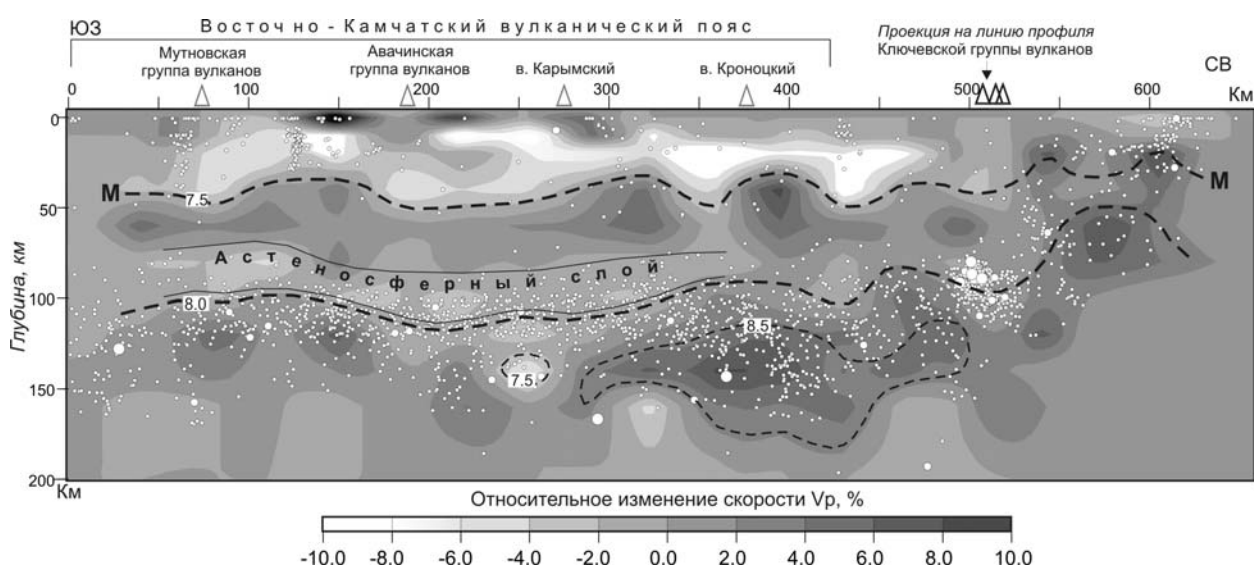


Рис. 4. Относительные процентные изменения скорости продольных волн.

Результаты моделирования для разрезов вдоль Восточно-Камчатского вулканического пояса. М – граница Мохо.

Представляемая работа вносит существенный вклад в решение данной проблемы, так как степень детальности полученной скоростной модели глубинного строения восточной Камчатки позволяет провести подробную геофизическую интерпретацию.

*В четвертой главе* - «Детальное исследование Северной группы вулканов Камчатки: построение одномерной и объемной скоростной модели среды» - уделено внимание всем этапам построения пространственной модели от отбора данных и расчета оптимальной одномерной модели, до выбора ячейки параметризации и расчета пространственного распределения скоростей Р- и S- волн.

Северная группа вулканов в структурном плане регионального характера приурочена к наиболее широкой части Центрально-Камчатской депрессии, а в межрегиональном – к зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Предполагается, что именно их взаимодействие на глубине обусловило появление Северной группы вулканов – самой крупной на Камчатке и одной из крупнейших в мире. Северная группа вулканов заметно отличается от соседних участков и по глубинному строению [Болдырев, 1974, Балеста и др., 1989, 1991, Пийп и др., 1991]. Она располагается в северной части обширной (280x130 км) области опусканий, которая по данным ГСЗ фиксируется даже на уровне границы Мохо.

Координаты района исследований: 55.5 – 56.8 с.ш., 159.0 – 162.5 в.д. Расчеты проводились на основе записей первых вступлений Р- и S-волн от вулканических землетрясений, записанных в период с января 2000 по июнь 2004 года. Каталоги и станционные данные любезно предоставлены КОМСП ГС ДВО РАН.

Оптимальная одномерная модель рассчитывалась на основе 527 событий, удовлетворяющих следующим условиям отбора: для каждого события не менее 16 четких вступлений Р- и S-волн, азимутальный охват меньше 100 градусов. Более жесткие, по сравнению с принятыми для всей

Камчатки, критерии отбора объясняются высоким качеством данных и большим количеством вулканических событий, которые регистрируются в данном районе.

Процесс расчета одномерной модели аналогичен проведенному для всей Камчатки и описанному в главе 2. Сначала рассчитывалась скоростная модель для Р-волн, затем для S-волн, потом совместная модель для продольных и поперечных волн. Все модели были протестированы на устойчивость к возмущению скорости и систематическому смещению гипоцентров землетрясений. Результаты тестирования одномерной модели, рассчитанной по Р- и S-волнам, позволили заключить, что она действительно является оптимальной для Северной группы вулканов, и в дальнейшем используется в качестве исходной для расчета пространственной модели распределения скоростей Р- и S-волн для Северной группы вулканов Камчатки.

В связи с большой сложностью района исследования ячейка параметризации должна выбираться достаточно малой. Это одно из основных условий выбора размеров модельного блока, которые в конечном итоге составили 10 км x 10 км x 5 км, что является достижением, потому что ранее блоки такого объема для томографической реконструкции данного района ни разу не использовались из-за недостатка данных и отсутствия соответствующего программного обеспечения [Балеста и др., 1976, 1989, 1991, Степанова, 2004, Сенюков, Яшук, 1987].

Разрешающая способность оценивалась тремя различными способами, если ориентироваться на строгую математическую оценку с помощью диагональных элементов матрицы разрешения, то видно, что область с относительно высокой и средней разрешающей способностью по площади мала, а максимальное значение разрешенности составляет 0.7. Информативны только слои, расположенные в диапазоне глубин 5-30 км, где возможно получить достаточно достоверную модель распределения скоростей сейсмических волн под Ключевской группой вулканов.

Было проведено синтетическое тестирование, которое ставило своей задачей определить влияние вычислительного алгоритма на результирующее расположение аномалий скорости. Исходя из результатов теста, можно заключить, что привнесенные в решение аномалии имеют определенную структуру – это круглые или вытянутые и расположенные под углом к нижней границе модели области скоростных аномалий разных знаков, симметричные относительно вертикальной оси, пересекающей поверхность в зоне расположения Ключевского вулкана, интенсивность которых не превышает  $\pm 6\%$ .

Для расчета пространственной модели по реальным данным времен пробега Р- и S-волн, было отобрано 11357 событий, общее число вступлений 164196, включая 86893 Р-фаз и 77303 S-фаз. Расчет проводился, также как и для всего полуострова Камчатка, с помощью программы SIMULPS14. В ходе вычислений среднеквадратичная ошибка (RMS) уменьшилась с 0.40 с до 0.24 с. Результаты вычислений представлены в виде горизонтальных и вертикальных сечений, проходящих через Ключевской вулкан в направлениях СЗ-ЮВ, З-В, Ю-С, ЮЗ-СВ, а глубины горизонтальных сечений совпадают с границами слоев модели.

Таким образом, можно заключить, что по результатам моделирования установлены следующие особенности скоростной структуры земной коры и раздела Мохо под Ключевской группой вулканов.

1. Выявлена приповерхностная низкоскоростная зона в интервале глубин 0-7 км, к которой приурочена группа ВТ поверхностных землетрясений. Эта область может быть интерпретирована как непосредственный приповерхностный магматический очаг Ключевского вулкана.

2. Выявлена низкоскоростная область в интервале глубин 25-35 км, в пределах которой значение параметра  $V_p/V_s$  понижено до около 1.7. На этом основании и с учетом других геофизических (в частности МТЗ) и

петрологических данных выявленную область, можно считать коровым очагом магмопитания вулканов.

3. Расположение и физические отличия источников землетрясений в области раздела Мохо от поверхностных сейсмических событий, позволяют предположить их связь с поступлением магмы (или флюида) из верхней мантии в коровый очаг по системе трещин или разлому.

4. Граница Мохо имеет изгиб: на юго-востоке поверхность раздела опускается на 5 км до глубины 40 км.

5. Обнаружена область повышенных скоростей продольных и поперечных волн на глубинах 10-25 км. Этой области соответствуют пониженные значения  $V_p/V_s$ , до 1.65. Такое изменение может быть объяснено уплотнением и изменением химического состава вещества, что вероятно происходит из-за того, что магма периодически поступает в эту область из глубинных слоев по системам трещин.

### ***Заключение.***

1. Впервые на основе комплекса сейсмологических данных времен вступлений региональных и ВТ землетрясений, полученных КОМСП ГС РАН, построена детальная объемная скоростная модель  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  с высоким пространственным разрешением для Камчатки и Ключевской группе вулканов. Детальность построенных моделей предоставила новые возможности геофизической и структурной интерпретации результатов.

2. В процессе расчетов был применен современный усовершенствованный подход к моделированию скоростного поля ( $V_p$ ,  $V_s$ ) в коре и верхней мантии Камчатского региона и района Ключевской группы вулканов, включающий в себя отбор данных, определение оптимальной одномерной модели (вместе со стационарными поправками), пересчет гипоцентров землетрясений относительно найденной оптимальной одномерной модели и вычисление пространственной скоростной модели.

3. Результаты моделирования, представленные в виде горизонтальных и вертикальных сечений пространственной модели, наглядно демонстрируют особенности полученных скоростных структур. Так, скоростное строение литосферы Камчатки свидетельствует о влиянии области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг на большую часть территории полуострова, по крайней мере, до зоны Малкинско-Петропавловских поперечных разломных зон.

4. Установлена расслоенность и значительная скоростная неоднородность литосферы переходной зоны континент-океан, в частности, существование слоев в мантийном клине (на глубине 80-120 км), из чего следует возможность течения вещества в области переходной зоны от океана под континентальный блок или, по крайней мере, смещение слоев. А отсюда, принимая во внимание, что мантия на северо-западе, в области стыка островных дуг и влияния Императорского хребта, более пластична и разогрета, то можно предположить, что более пологое простирание СФЗ связано с интенсивным смещением слоев, а в целом наклон СФЗ обусловлен присутствующими сдвиговыми деформациями.

5. Кроме того, показана взаимосвязь особенностей геометрии (изменение наклона и плоскости простирания фокальной зоны) и сейсмичности СФЗ с выявленными скоростными аномалиями – максимум сейсмичности связан с нижней границей астеносферного слоя и верхней частью высокоскоростного слоя, интерпретируемой как Тихоокеанская плита. Отмечается существенная скоростная неоднородность океанической плиты – вариации скорости составляют до 4% в пределах выделенной зоны, в которой также предполагается существование разрывов.

6. Выделены поперечные разломные зоны мантийного заложения в Авачинском и Камчатском заливах, которые пересекают континентальный склон с относительным смещением его частей. Упомянутые разломные зоны также проявляются в аномалиях магнитного поля и теплового потока. Также показана взаимосвязь современных тектонических элементов

Камчатки - Восточно-Камчатского вулканического пояса и Центрально-Камчатской депрессии – со скоростными аномалиями в мантии, а именно с астеносферным слоем пониженных скоростей  $V_p$  и  $V_s$  на глубине 80-120 км.

7. Для Ключевской группы, построена детальная скоростная модель (по Р- и S- волнам) земной коры и верхней мантии. Ключевская группа располагается в узле пересечения разломов глубинного заложения, поэтому мантия здесь разогрета и ослаблена, кроме того, в этой области есть вероятность существования разрыва (или окна) в плите [Levin et al., 2002a], что может объяснять высокую вулканическую активность и поступление магматического вещества.

8. Выявлена низкоскоростная зона в приповерхностных слоях на глубине 0-5 км, которая предположительно интерпретируется как коровый очаг Ключевского вулкана. Данные гравиметрии не противоречат такому заключению [Зубин и др., 1990]. Также обнаружена яркая низкоскоростная неоднородность на глубине 25-35 км по Р- и S-волнам. Предполагается существование взаимосвязи между скоростными аномалиями в верхней мантии и в земной коре, демонстрирующей возможные процессы накопления магматического вещества и пути его распространения к поверхности. Предположительно, слабосейсмичная высокоскоростная зона на глубине 5-20 км обусловлена периодическим проникновением магматического вещества из более глубоких слоев. Скорее всего, материал из нижнекорового очага поднимается на поверхность, огибая эту зону.

9. Было проведено сопоставление полученных скоростных моделей для Ключевской группы с данными гравиметрии, теплового потока, магнитного поля и значениями электропроводности, которое показало приуроченность высокоградиентных скоростных зон областям аномальных значений геофизических полей.

Таким образом, установлена четкая взаимосвязь скоростных структур с особенностями сейсмичности, основными элементами современной



тектоники, геофизическими полями, в частности тепловым, гравитационным и магнитным.

Построенная объемная модель для Камчатки может быть использована в дальнейших исследованиях глубинного строения региона. Так, детальность и точность полученной скоростной модели позволяет рассчитать поправки, вносимые в поле скоростей за счет распространения упругих волн в коре. После чего, пользуясь современной методикой телесеismicческой томографии с высоким пространственным разрешением, можно восстановить скоростную структуру мантийной части (до 200-600 км) зоны перехода океан-континент в районе Камчатки.

***По теме диссертации опубликованы следующие работы:***

1. Низкоус И.В., Санина И.А., Гонтовая Л.И. Пространственная скоростная структура литосферы Камчатки по данным сейсмической томографии // Сборник научных трудов ИДГ РАН. – М., 2004. – С. 152-159.

2. Санина И.А., Низкоус И.В., Гонтовая Л.И., Кисслинг Э. Структура Камчатской зоны субдукции по результатам сейсмической томографии // ДАН. – 2005. Т.403. №6. - С. 1–6.

3. Низкоус И.В., Санина И.А., Кисслинг Э., Гонтовая Л.И. Скоростные свойства литосферы переходной зоны океан-континент в районе Камчатки по данным сейсмической томографии // Физика Земли. В печати.

Тезисы докладов:

4. Nizkous I., Sanina I., Gontovaya L. 1D Minimum P-velocity model of the Kamchatka subducting zone // Geophys. Res. Abstr. Volume 5. – Nice: EGS-AGU-EUG Joint Assembly, 2003.

5. Низкоус И., Кисслинг Э., Гонтовая Л., Санина И. Сейсмическая томография Камчатки: применение высокоразрешающих методов // Геофизические чтения им. Федынского. Тезисы докладов. – М., 2004 – С.56.

6. Nizkous I., Kissling E., Gontovaya L., Sanina I. High-resolution approaches to Kamchatka seismic tomography // Geophys. Res. Abstr. Volume 6. – Nice: General Assembly EGU, 2004.

7. Gontovaya L., Stepanova M., Senyukov S., Nizkous I., Gordienko L. 3D velocity structure of Klyuchevskoi volcano group (Kamchatka) // Geophys. Res. Abstr. Volume 6. – Nice: General Assembly EGU, 2004.

8. Nizkous I., Kissling E., Gontovaya L., Levina V. Structure of Lithosphere Velocity Heterogeneities in Kamchatka and Their Relation with Subduction Processes // IV International Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Japan-Kurile-Kamchatka-Aleutian Arcs. – Petropavlovsk-Kamchatsky, 2004. –P. 104-105.

9. Gontovaya L., Nizkous I., Kissling E., Senyukov S., Sanina I., Khrenov A. Deep Structure of Kamchatka Northern Volcanic Group: seismicity, 3D velocity structure, and magma sources // IV International Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Japan-Kurile-Kamchatka-Aleutian Arcs. – Petropavlovsk-Kamchatsky, 2004. – P.20-21.

10. Nizkous I., Kissling E., Gontovaya L., Sanina I. Kamchatka 3D lithosphere P and S velocity by local earthquake tomography // XXIX General Assembly of the European Seismological Commission. Abstracts. - Potsdam, 2004.

11. Nizkous I., Kissling E., Sanina I., Gontovaya L., Senyukov S. High-resolution tomography application to Northern volcanic group in Kamchatka (Russia) // Geophys. Res. Abstr. Volume 7. - Vienna: EGU General Assembly, 2005.