

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
ИМ. А.А. ТРОФИМУКА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Кузнецов Павел Юрьевич
ИЗУЧЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ВУЛКАНА ГОРЕЛЫЙ (КАМЧАТКА)
МЕТОДОМ ПАССИВНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

1.6.9 - геофизика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:

Кулаков Иван Юрьевич

доктор геол.-мин. наук, член-корреспондент РАН

Новосибирск - 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	10
1.1 История развития сейсмической томографии.....	10
1.2 Изучение вулканов различными методами сейсмической томографии ...	12
1.3 Исследования вулканов схожих с вулканом Горелый	27
1.4 Вулканизм Камчатки	33
1.5 Объект исследования – вулкан Горелый	39
Глава 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ ...	48
2.1 Сейсмологическое оборудование и установка временной сети станций..	48
2.2 Программа DIMAS для обработки волновых форм	51
2.3 Область использования и этапы алгоритма программы LOTOS	58
2.4 Подробное рассмотрение этапов работы алгоритма локальной сейсмической томографии LOTOS.....	60
2.5 Реализация синтетических тестов в программе LOTOS.....	69
Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ	72
3.1 Результаты обработки сейсмоданных и локализации источников.....	72
3.2 Локальная сейсмическая томография, построение скоростных моделей .	76
3.3 Синтетическое моделирование. Результаты тестов	87
3.4 Интерпретация полученных результатов	90
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	99

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования является активный вулкан Горелый на полуострове Камчатка.

Актуальность исследования:

Извержения вулканов представляют серьезную опасность для населения и инфраструктуры на прилегающих к ним территориях, а в некоторых случаях, способны оказывать влияние в масштабах крупных регионов и даже всей Земли. В течение существования человеческой цивилизации крупные взрывные извержения неоднократно приводили к существенным изменениям климата и экосистем на нашей планете, что в некоторых случаях вызывало значительные исторические потрясения. Изучение внутренних механизмов, приводящих к вулканическим катастрофам, является актуальной задачей, которая может помочь уточнить прогноз времени и масштаба извержения, тем самым позволяя минимизировать негативные последствия.

Сложные механические, термические и химические процессы в активных вулканах по сравнению с прочими геологическими процессами протекают очень быстро, что позволяет производить их изучение в реальном времени. Поэтому актуальной является задача использования метода локального сейсмического мониторинга для изучения детального строения магматических очагов и их изменения во времени.

Большую концентрацию вулканов можно наблюдать в восточной части Российской Федерации – на полуострове Камчатка. Вулканы Камчатки входят в Тихоокеанское огненное кольцо, которое содержит около 90% активных вулканов на планете. Причина возникновения вулканов связана с наличием процесса субдукции, в ходе которого одна литосферная плита погружается под другую. Плавление и выделение флюидов из погружающейся плиты является главной причиной возникновения магматических очагов в мантии и коре. На Камчатке насчитывается порядка 300 вулканов, из них около 30 считаются активными, что

делает данную территорию одной из наиболее “горячих” на Земле. Объектом настоящего исследования является действующий вулкан Горелый, который находится всего в 70 километрах от Петропавловска-Камчатского и в последние десятилетия эпизодически показывает высокий уровень дегазации и сейсмичности. Геологические свидетельства говорят о том, что в его активности чередуются периоды взрывных андезитовых извержений и более спокойных излияний лавы базальтового состава. Современная постройка вулкана Горелый находится в кальдере, образовавшейся в результате мощного извержения, произошедшего 33,6 тысяч лет назад. Повторение такого взрывного извержения привело бы к катастрофическим последствиям для близлежащих населенных пунктов и, возможно, повлияло бы на климат в региональном и глобальном масштабах. Учитывая все эти факторы, изучение вулкана Горелый представляется актуальной научной задачей.

Стоит отметить, что структура этого вулкана никогда ранее не изучалась методами сейсмической томографии; это первое исследование такого рода. Изучение внутренней структуры вулкана Горелый позволит лучше понять процессы под ним, приводящие к извержениям. Информацию, полученную при исследовании магматической системы, можно будет обобщить и распространить на аналогичные вулканы в мире.

Цель исследования: изучение геологической структуры вулкана Горелый, используя метод пассивной сейсмической томографии.

Научные задачи:

- получить распределение гипоцентров локальных землетрясений под вулканом Горелый.
- построить трехмерные модели распределения скоростей продольных и поперечных сейсмических волн в верхней коре под вулканом Горелый, используя данные с временной сети станций и метод пассивной сейсмической томографии.
- произвести геологическую интерпретацию результатов, полученных в ходе томографической инверсии.

Основные этапы исследования:

1. Проведение полевых работ по установке и снятию временной сети станций на вулкане Горелый для непрерывной записи колебаний грунта в течение одного года.
2. Обработка трехкомпонентных волновых форм, снятие и накопление времен первых вступлений P- и S-волн от локальных землетрясений.
3. Определение гипоцентров землетрясений и получение распределения скоростей сейсмических волн в области под вулканом, используя алгоритм пассивной сейсмической томографии.
4. Верификация разрешающей способности полученной сейсмической модели с помощью синтетических тестов.
5. Геологическая интерпретация полученных результатов.

Научная новизна:

1. На основе обработки сейсмологических данных с временной сети станций, впервые получено распределение гипоцентров землетрясений под вулканом Горелый.
2. Построены сейсмические модели для скоростей продольных и поперечных волн в верхней коре вулкана Горелый с использованием метода пассивной сейсмической томографии.
3. В ходе определения оптимальной одномерной референтной модели сейсмических скоростей под вулканом Горелый, обнаружено аномально низкое среднее значение отношения V_p/V_s , равное 1,53.
4. Анализ полученной трехмерной модели сейсмических скоростей и отношения V_p/V_s позволил выделить магматическую камеру, насыщенную расплавами, которая, в свою очередь, окружена газосодержащими породами, а также выделить границу, где предположительно происходит выделение газонасыщенного флюида из магмы.

Личный вклад: Автор принимал участие на каждом этапе исследования: в подготовке и настройке сейсмологического оборудования, в установке и снятии временной сети станций на вулкане Горелый в 2013-2014 гг., в снятии данных с сеймостанций и первичной обработке волновых форм, в выделении времен прихода продольных и поперечных волн, в получении скоростных моделей внутренней структуры вулкана используя алгоритм программы LOTOS, в верификации полученных моделей и их разрешающей способности с помощью синтетических тестов. Соискатель выполнил геологическую интерпретацию полученных результатов и непосредственно занимался подготовкой статей и тезисов конференции по результатам исследования.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Получено распределение сейсмичности под вулканом Горелый в результате обработки непрерывных данных пассивного сейсмического мониторинга. Выделено 360 гипоцентров локальных землетрясений, которые распределены непосредственно под постройкой вулкана Горелый до глубины 6 километров, достигая максимальной концентрации на глубине 1-2 километра ниже уровня моря.
2. Построена трехмерная скоростная модель распределения продольных и поперечных сейсмических волн под вулканом Горелый методом локальной сейсмической томографии до глубины 6 километров. Обнаружено, что среднее отношение V_p/V_s под вулканом имеет аномально низкое значение равное 1,53. В области под вулканом оно варьируется в широких пределах от 1,4 до 2.
3. На основании анализа сейсмических моделей, на глубине 1,5-2 километра ниже уровня моря обнаружен магматический очаг, состоящий из насыщенных расплавами пород с высоким отношением V_p/V_s . Окружающие его области с пониженным отношением V_p/V_s соответствуют породам с высоким содержанием газов. Резкий переход значения V_p/V_s на глубине 1-1,5 километра ниже уровня моря интерпретируется как граница, где происходит выделение флюида с высоким содержанием газа из магмы.

Высокая степень достоверности результатов подтверждается рядом синтетических тестов, проведенных в ходе исследования, проверяющих разрешающую способность системы наблюдения и полученные скоростные модели. В качестве проверки использовался стандартный для томографии тест «шахматная доска» с различными параметрами задаваемых аномалий. В исследовании автор использовал проверенные программы: для пассивной сейсмической томографии - LOTOS и для обработки волновых форм – DIMAS. Полученные результаты были проанализированы и сопоставлены с результатами других исследований по изучаемому объекту, в которых использовались различные геофизические методы, а также с исследованиями схожих по характеристикам вулканов.

Теоретическая и практическая значимость.

Важным теоретическим результатом работы является получение методом пассивной сейсмической томографии скоростных моделей внутренней структуры вулкана Горелый. Результаты томографической инверсии позволяют выделить зоны со значительными вариациями значений скоростей продольных и поперечных волн и отношения V_p/V_s , на основании которых можно судить о функционировании магматической системы на этапе активной дегазации.

Полученные результаты на практике позволят лучше понять процессы, протекающие в питающей магматической системе вулкана Горелый, что в дальнейшем может быть использовано для повышения качества прогнозов эруптивной активности этого и некоторых других вулканов аналогичного типа.

Работа выполнена при поддержке: Российского научного фонда - проект 14-17-000430; Российского фонда фундаментальных исследований – проект мол_a 16-35-00090; полевые работы в 2014 году были поддержаны грантом National Geographic Society 9445-14.

Апробация работ. Научные результаты работы докладывались на международных и всероссийских конференциях и симпозиумах: г. Вена, Австрия,

2013, 2014, 2015, 2016; г. Новосибирск, Россия, 2013; г. Петропавловск-Камчатский, Россия, 2018.

Материалы диссертации полностью изложены в 6 научных публикациях: в 4 статьях опубликованных в рецензируемых научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК, из них 3 статьи индексируются в международных базах цитирования Web of Science, Scopus: Geosciences, Journal of Volcanology and Geothermal Research и Solid Earth; 2 – в материалах российских и международных конференций и симпозиумов:

- Kuznetsov, P. Structure of volatile conduits beneath Gorely volcano (Kamchatka) revealed by local earthquake tomography / P. Kuznetsov, I. Koulakov, A. Jakovlev, I. Abkadyrov, E. Deev, E. Gordeev, S. Senyukov, S. El Khrepy, N. Al Arifi // Geosciences. – 2017. – Т. 7. – №. 4. – С. 111. (WoS; Scopus)
- Кулаков, И. Ю. Паровая машина вулкана Горелый / И. Ю. Кудаков, П. Ю. Кузнецов // Природа. – 2015. – №. 6. – С. 91. (перечень ВАК)
- Kuznetsov, P. Y. The three-dimensional structure beneath the Popocatepetl volcano (Mexico) based on local earthquake seismic tomography / P. Y. Kuznetsov, I. Y. Koulakov // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2014. – Т. 276. – С. 10-21. (WoS; Scopus)
- Koulakov, I. Evidence of magma activation beneath the Harrat Lunayyir basaltic field (Saudi Arabia) from attenuation tomography / I. Koulakov, S. El Khrepy, N. Al-Arifi, I. Sychev, P. Kuznetsov // Solid Earth. – 2014a. – Т. 5. – №. 2. – С. 873-882. (WoS; Scopus)

2 – в материалах российских и международных конференций и симпозиумов:

- Koulakov, I. Evidences for high gas content beneath the Gorely volcano in Kamchatka (Russia) based on very low V_p/V_s ratio revealed from local earthquake tomography / I. Koulakov, P. Kuznetsov, E. Gordeev, V. Chebrov // EGU General Assembly Conference Abstracts. – 2015b. – Т. 17.

- Jakovlev, A. Temporary seismic networks on active volcanoes of Kamchatka (Russia) / A. Jakovlev, I. Koulakov, I., Abkadyrov, N. Shapiro, P. Kuznetsov, E. Deev, E. Gordeev, V. Chebrov // 10th Biennial workshop on Japan-Kamchatka-Alaska subduction processes (JKASP-2018) (Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, August 20-26, 2018): Abstracts. – 2018. – С. 99-101.

Объем и структура работы: Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 116 страниц с 49 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 143 наименований.

Благодарности:

Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю, доктору геолого-минералогических наук, член-корреспонденту РАН, Кулакову Ивану Юрьевичу за постоянное внимание и огромную поддержку в процессе работы и написании диссертации.

Автор глубоко благодарен Яковлеву А.В, Дееву Е.В., Абкадырову И.Ф. и Абраменкову С.С. – научным сотрудникам института ИНГГ СО РАН, входящим в полевой отряд, установивший в 2012 году временную сеть станций на вулкане Горелый. А также Гордееву Е.И. и Сенюкову С.Л. за предоставление возможности и обеспечении всем необходимым для проведения полевых работ.

Автор признателен Дрознину Д.В. и Дрозниной С.Я. за предоставление интерактивной программы обработки сейсмических сигналов DIMAS и в обучении работы с вулканическими землетрясениями.

Глава 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 История развития сейсмической томографии

Сейсмическая томография, или сейсмотомография, является одним из самых эффективных инструментов получения информации о внутреннем строении Земли на основании различных параметров зарегистрированных сейсмических волн от различных источников. Для объемных продольных и поперечных волн в большинстве случаев используется кинематический подход, согласно которому распределение сейсмических скоростей получается путем инверсии времен пробега сейсмических волн. Помимо этого, в задачах сейсмической томографии используют параметры затухания и рассеяния. Большой объем работ выполняется на основании данных по поверхностным волнам, полученных в результате записей от землетрясений и путем анализа природного сейсмического шума (ambient noise tomography).

Первые работы по решению обратных кинематических задач датируются началом двадцатого века [Herglotz, 1907; Wiechert, 1907]. Становление методов сейсмической томографии началось с решения одномерной задачи, но с совершенствованием алгоритмов и компьютерных технологий пришло к решению трехмерных задач. Большой вклад в развитие метода внесли такие ученые как М.Л. Гервер и В.М. Марушкевич [Гервер и Марушкевич, 1965], которые показали характер неоднозначности решения обратной кинематической задачи. М.М. Лаврентьев и В.Г. Романов представили результаты двумерной постановки обратной задачи [Лаврентьев и Романов, 1966]. Основными работами в исследовании кинематических задач в линеаризованной постановке являются работы А.С. Алексеева, М.М. Лаврентьева, В.Г. Романова и др. [Алексеев и др., 1969; Алексеев и др., 1979].

Решение обратной кинематической задачи требует расчета времен пробега сейсмических волн в среде с заданными свойствами, что является прямой кинематической задачей. Данная задача может быть решена несколькими

методами трассировки лучей. Метод пристрелки состоит в многократном решении задачи Коши с целью подбора направления по которому луч из источника попадет в приемник [Peryra et al., 1980; Sun, 1993]. Методы пристрелки плохо устойчивы в средах с сильными перепадами скорости и требуют больших компьютерных ресурсов. Частично сложности метода пристрелки можно избежать путем решения уравнения Эйконала [Trier and Symes, 1991; Sethian and Popovich, 1997], при котором не требуется строить лучи. Наиболее распространённым в практических приложениях сейсмической томографии является метод изгиба лучей, суть которого заключена в подборе геометрии луча с помощью минимизации функционала Ферма для фиксированной пары источник-приемник [Оболенцева и Гречка, 1988; Um and Thurber, 1987].

В настоящий момент обратная кинематическая задача решается путем поиска целевого функционала, который является нормой разности измеренных данных и данных, полученных при решении прямой задачи [Pederson et al., 1985]. Существуют три основных численных метода: матричное обращение, преобразование Фурье, алгебраическая процедура восстановления [Хаттон и др., 1989]. Метод алгебраической процедуры восстановления широко применялся в 80-х годах, когда вычислительные мощности оборудования не позволяли производить большое количество расчетов одновременно. Он был разработан Gordon R.A. и другими, и назван ART - Algebraic Reconstruction Techniques. Различные алгоритмы реализации данного метода представлены в работах [Gordon, 1974, Herman and Lent, 1976; Dines and Lytle, 1979].

Примерно в тоже время получил развитие метод преобразования Фурье, основанный на теореме о центральном сечении спектра [Mersereau and Oppenheim, 1974]. С учетом всех неоспоримых преимуществ метода, таких как быстрота расчетов и строгая математическая обоснованность, метод имел и серьезные ограничения. Предполагалось, что траектории лучей прямолинейны, а также он подразумевал идеальное освещение изучаемого объекта со всех сторон, что практически недостижимо в геофизических экспериментах для изучения

реальной Земли. Поэтому, с совершенствованием оборудования и ростом вычислительной мощности, наиболее популярным методом стал метод матричного обращения. Преимущества метода состоят в отсутствии ограничений на геометрию распределения источников и приемников, а также форму траектории луча.

На сегодняшний день сейсмическая томография получила широкую распространённость в сфере науки. Развитие большого количества методов и алгоритмов, и их применимость на абсолютно разных объектах исследования, как по масштабу, так и по физическим свойствам, сделали сейсмическую томографию универсальным инструментом исследования Земли с использованием упругих волн.

1.2 Изучение вулканов различными методами сейсмической томографии

Сейсмическая томография - универсальный метод, но у каждого изучаемого объекта свои уникальные физические, химические свойства и строение. Поэтому, в зависимости от изучаемого объекта и поставленных задач, может использоваться та или иная разновидность сейсмической томографии. На сегодняшний день, для изучения вулканов, применяются такие методы: томография с активными источниками, пассивная сейсмическая томография, эмиссионная томография, томография с использованием сейсмического шума. Существует также метод приемных функций, не столь популярный в применении на активных вулканах из-за своей глубинности. Далее рассмотрим каждый тип томографии отдельно, опишем преимущества и отметим недостатки.

Томография с активными источниками использует данные по временам пробега лучей от контролируемых человеком источников возбуждения волн до приемников, например, взрывы, вибрационная установка, гидропушки и другое. Например, в работе [Zandomeneghi et al., 2013] в 2010 году в Антарктиде были сделаны 11 химических взрывов, которые были записаны на 91 станцию, что в конечном итоге позволило изучить внутреннюю структуру вулкана Эребус.

Основными входными данными метода являются: времена вступлений Р-волн, координаты источников и сейсмоприемников. По использованию томографии с активными источниками существует множество зарубежных и отечественных работ, в том числе и по изучению вулканов. В рамках эксперимента TOMOVES (Tomography on Vesuvius), который проходил с 1994 по 1996 на активном вулкане Везувий (Италия), было произведено 14 взрывов в скважинах, сигналы от которых были зарегистрированы несколькими десятками станций, установленных в окрестности вулкана. Обработка этих данных производилась разными исследовательскими группами, в результате чего была изучена внутренняя структура вулкана [Gasparini, 1998; Zollo et al., 2000; Di Stefano and Chiarabba, 2002]. Одной из последних работ по этим данным с использованием активной сейсмической томографии стала [Тихоцкий и Ахауер, 2011], в которой авторы, используя уже накопленный материал предыдущих исследований, подтвердили и уточнили скоростную модель. В результате, была обнаружена высокоскоростная аномалия непосредственно внутри вулканического конуса, низкоскоростные аномалии на флангах вулкана.

Методы активной сейсмологии использовались и для изучения вулканов на полуострове Камчатка. Большое количество работ основано на экспериментах глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) с использованием взрывов и других источников. Например, таким способом достаточно хорошо изучен район Авачинско-Корякской группы вулканов, расположенный в ~30 километрах от г. Петропавловск-Камчатский [Аносов и др., 1978; Балеста и др., 1988]. Результаты исследований по ГСЗ также представлены в работах Аносов Г.И. [1974], Балеста С.Т. [1984], Попов А.А. [1987] и Гонтовая Л.И. [2003]. Из более современных исследований можно отметить работу, в которой часть работы была сделана с использованием данных по ГСЗ с профиля 1982-1984 гг. [Koulakov et al., 2014b]. Результаты были сопоставлены с данными по пассивной сейсмической томографии и построена сейсмическая модель под вулканом Авача (Рисунок 1.1),

которая в свою очередь позволила уточнить ранее полученную в других исследованиях [Балеста и др., 1988] скоростную модель.

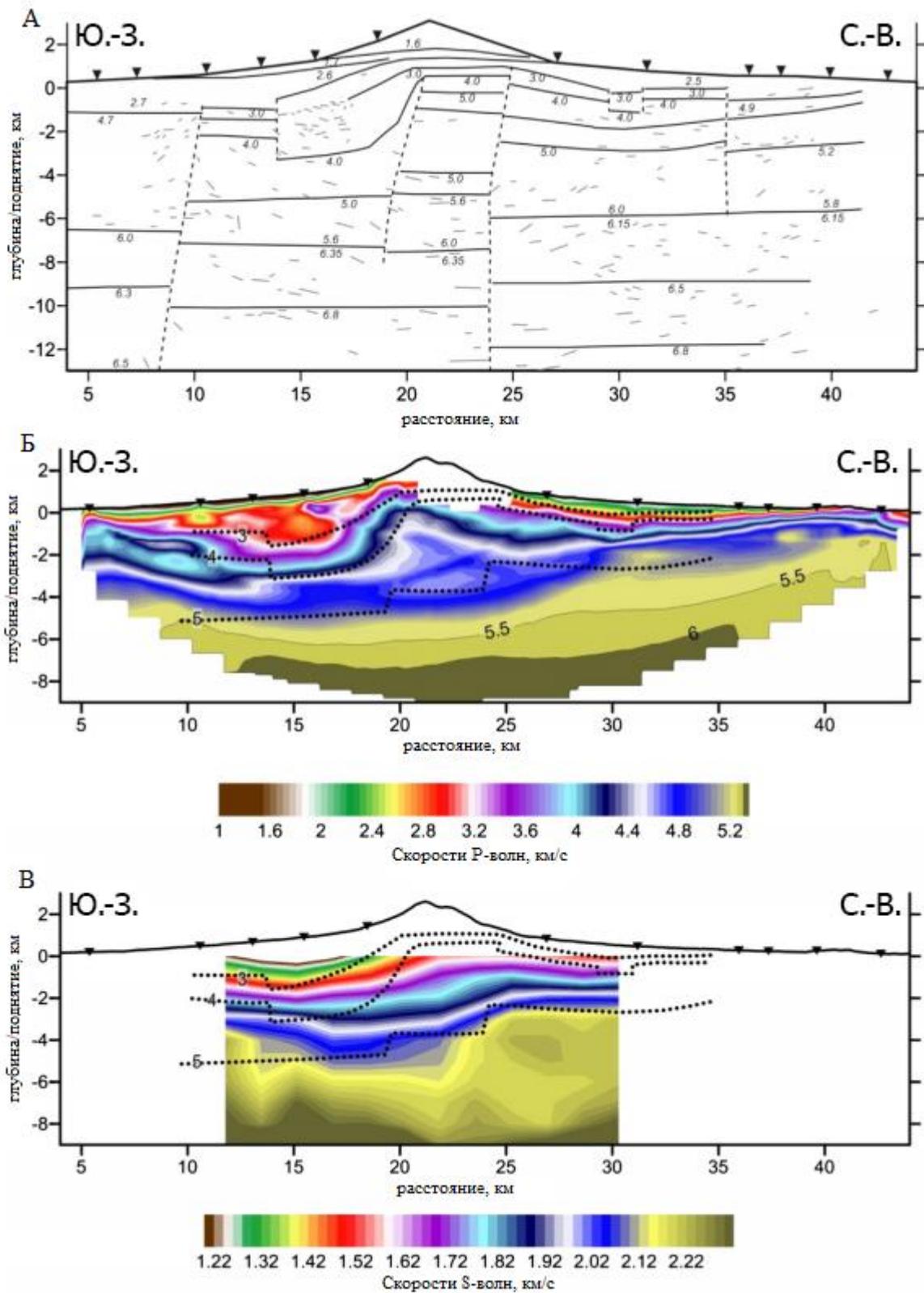


Рисунок 1.1 – Три сейсмические модели: А – результаты сейсмического моделирования по профилю ГСЗ из работы [Балеста и др., 1988]. Сплошные линии и числа – оценка

скорости, полученная по анализу времен прохождения преломленных волн. Серые палочки – это точки отражения, полученные при анализе. Пунктирные линии – предполагаемые места глубоких разломов. Б, В – результаты томографической инверсии с учетом данных по ГСЗ и данных землетрясений. Пунктирные линии соответствуют границам со скоростями 3, 4 и 5 км/с (начиная сверху). (В) – абсолютные скорости для Р-волн [Koulakov et al., 2014b], (С) – абсолютные скорости для S-волн [Koulakov et al., 2014b].

На сегодняшний день наиболее распространенными источниками возбуждения волн в активной сейсмической томографии являются пневмопушки/гидропушки. Они значительно дешевле, предоставляют большее количество данных и, главное, экологичнее взрывов. Например, с помощью таких установок были получены сейсмические данные в регионе вулкана Тенерифе [Ibáñez et al., 2008] и вулкана Десепшн [Ben-Zvi et al., 2009], что, в свою очередь, позволило изучить структуру под вулканами, используя сейсмическую томографию [García-Yeguas et al., 2012; Zandomenighi et al., 2009].

Пассивная сейсмическая томография имеет ту же суть что и активная, но с одним большим отличием, которое привносит в процесс исследования с одной стороны положительные аспекты, с другой стороны добавляет некоторые сложности. Отличием являются источники возбуждения - в активном методе они техногенные и контролируемые, в случае пассивной сейсмотомографии они естественные. Основными такими природными явлениями являются землетрясения. Сложность заключается в том, что такие источники неконтролируемы и это добавляет дополнительные этапы работы в исследованиях, т.к. необходимо локализовать гипоцентры событий. При этом качество результатов становится более зависимым от стартовой скоростной модели и погрешностей при определении гипоцентров. С другой стороны, ученые получают источники сейсмических волн, расположенные на глубине внутри изучаемого объекта. Это дает определенные преимущества в геометрии лучей по сравнению с активной сейсмикой, где источники возбуждения находятся вблизи поверхности. Сейсмические сети, функционирующие в течение продолжительного периода времени, способны зарегистрировать большое число землетрясений, несопоставимое по количеству с искусственными взрывами. Этот

факт приводит к более плотному покрытию изучаемой области данными, что важно для обеспечения высокого качества восстановления сейсмического строения глубинных структур. В связи с этим, данный метод сейсмической томографии достаточно широко распространен в практических исследованиях вулканов. За последние десятилетия с его помощью выполнены десятки исследований магматических систем в различных частях мира.

Как было сказано ранее, в пассивной сейсмической томографии используются природные источники возбуждения волн, которые позволяют накопить большое количество данных для использования в томографии, что можно увидеть в работе [Koulakov et al., 2011]. На основе данных с 17 стационарных станций, в районе Ключевской группы вулканов, за 2004 год удалось выделить более 5000 локальных землетрясений, что дало более 66000 вступлений Р и S-волн. Проведение исследования методом пассивной сейсмической томографии позволило выделить несколько зон с повышенным значением V_p/V_s и предположить существование трех магматических камер на разных уровнях, что в свою очередь объясняет разнообразие в составе изверженных лав вулканов Ключевской группы (Рисунок 1.2).

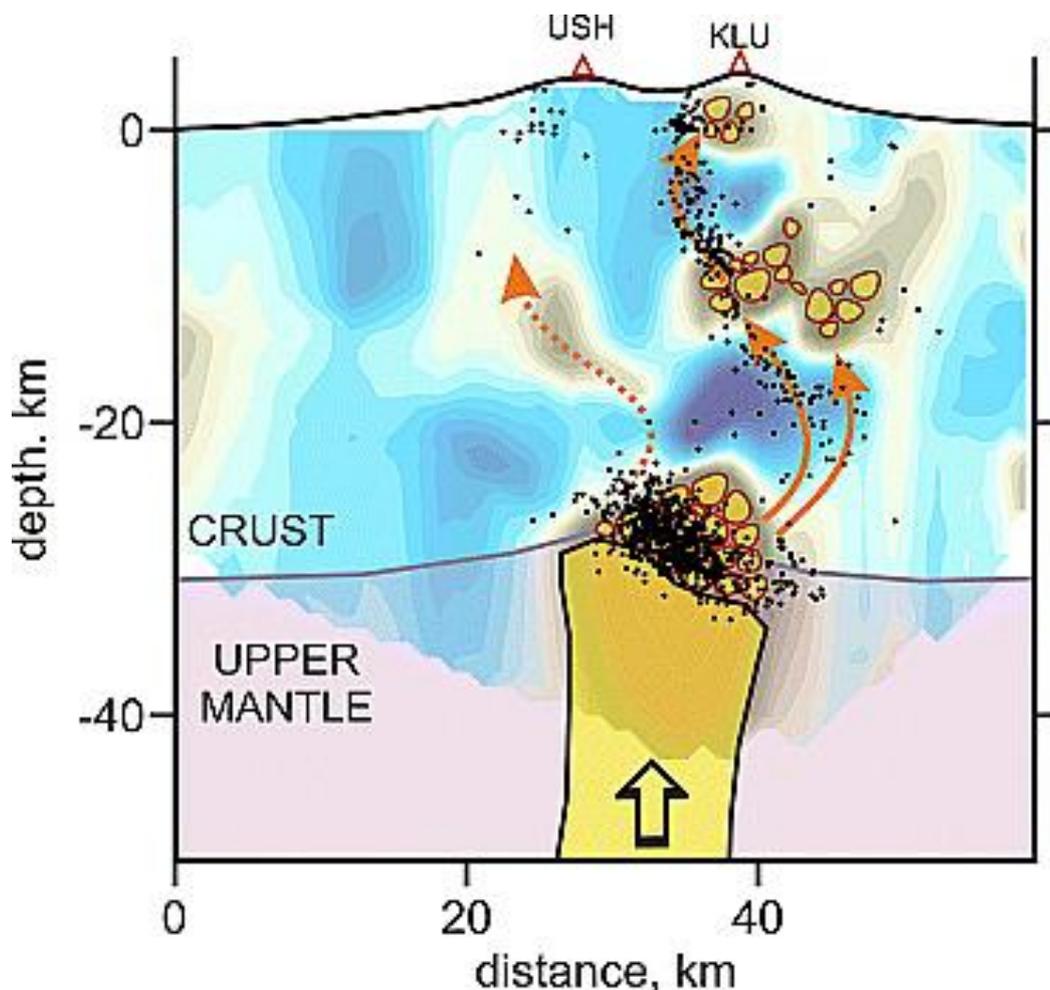


Рисунок 1.2 – Результаты томографии в области Ключевской группы вулканов [Koulakov et al., 2011]. Черные точки – распределение землетрясений. Желтые области, совпадающие с аномальными значениями V_p/V_s , представляют магматические камеры, расположенные на трех разных глубинах. Красные стрелки – предположительное распространение флюида.

Работа [Kasatkina et al., 2014] показывает, что пассивную сейсмическую томографию можно использовать для изучения изменения структуры во времени. В ходе исследования вулкана Реддаут (Mt. Redoubt) были построены сейсмические модели распределения скоростей в области под вулканом, соответствующие двум периодам: до и после сильного извержения в марте 2009 года (Рисунок 1.3). Анализ результатов показал, что до извержения аномалии Р и S-волн положительны, а значение отношения V_p/V_s относительно небольшое - 1,75-1,80. Однако после извержения картина меняется: если аномалия Р-волн остается практически неизменной, то для S-волны скорость существенно понижается, что приводит к резкому увеличению отношения V_p/V_s - до 2,2. Как утверждают

авторы, это может означать, что до извержения вулкана его верхняя область, сложенная из твердых магматических пород, была слабо насыщена флюидами. Результаты, соответствующие времени после извержения, указывают на наличие подвижной фазы в этой области, которая может быть представлена в виде частично расплавленных или насыщенных флюидами пород.

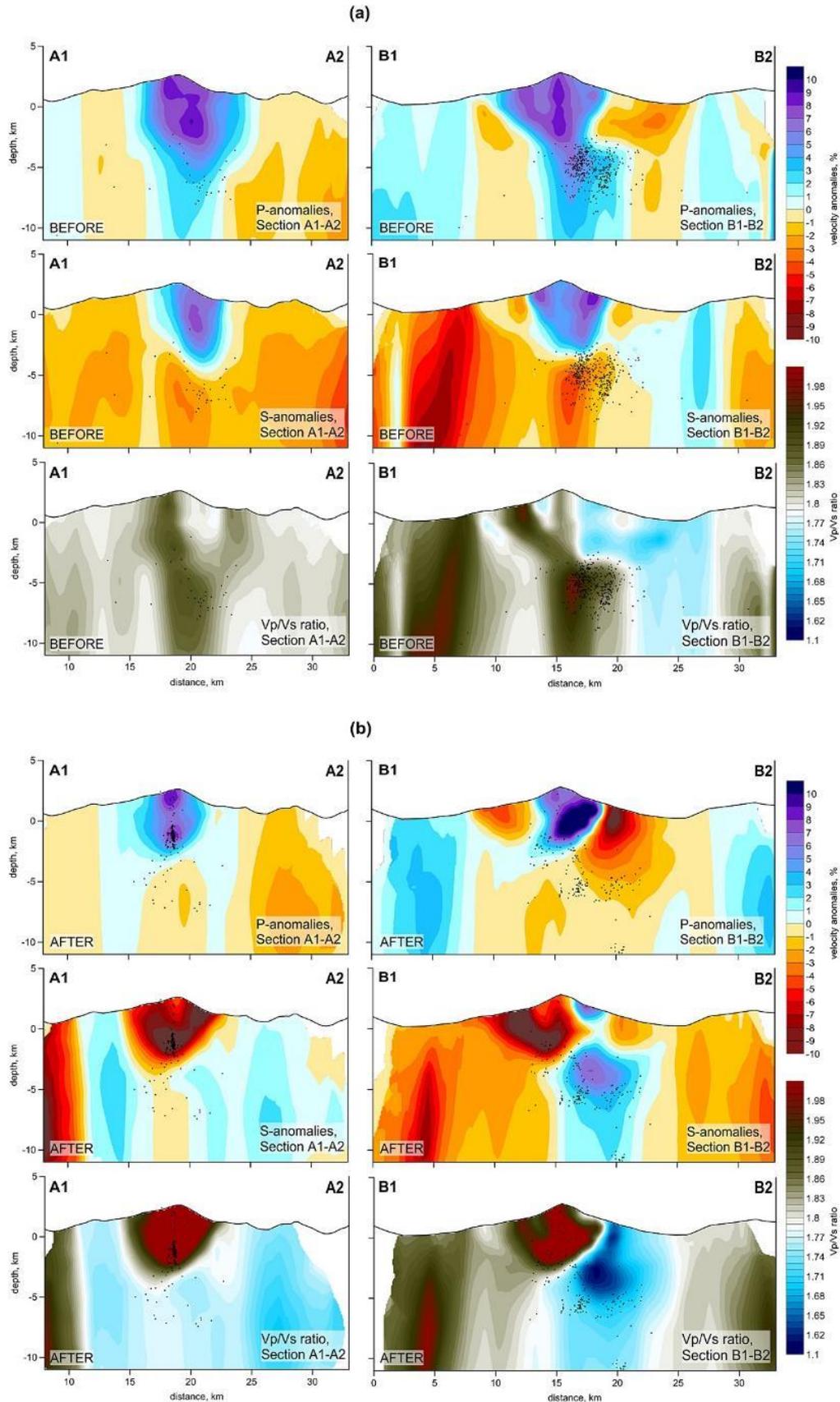


Рисунок 1.3 – Аномалии скоростей P и S-волн и отношения V_p / V_s на вертикальных разрезах [Kasatkina et al., 2014]: (а) до извержения 2009 года и (б) после извержения 2009 года. Черными точками обозначены места событий на расстоянии менее 0,4 км от профиля.

С участием автора диссертации метод пассивной сейсмической томографии был успешно применен в изучении внутренней структуры вулкана Попокатепетль (Мексика) [Kuznetsov and Koulakov, 2014]. С 1999 по 2000 год на вулкане была развернута временная сеть сейсмологических станций для регистрации землетрясений. Обработка волновых форм позволила выделить 504 события в радиусе 50 километров, что значительно превышает область обхвата сети, и выделить 6089 времен вступлений Р и S-волн. Синтетические тесты показали, что имеющегося объема данных и конфигурации временной сети станций достаточно для получения качественных результатов посредством сейсмической томографии. Анализ полученных скоростных моделей (Рисунок 1.4) позволил выделить зону в виде гриба с повышенными скоростями Р-волн, что может говорить о наличии избыточного давления затвердевших магматических пород, из которых сложена постройка вулкана Попокатепетль. Также выделяется достаточно высокое значение отношения V_p/V_s непосредственно под центром вулкана от его поверхности до глубины 4 километра ниже уровня моря. Данная аномалия, вероятно, указывает на наличие трещин и пор в породах, заполненных расплавами и жидкостями.

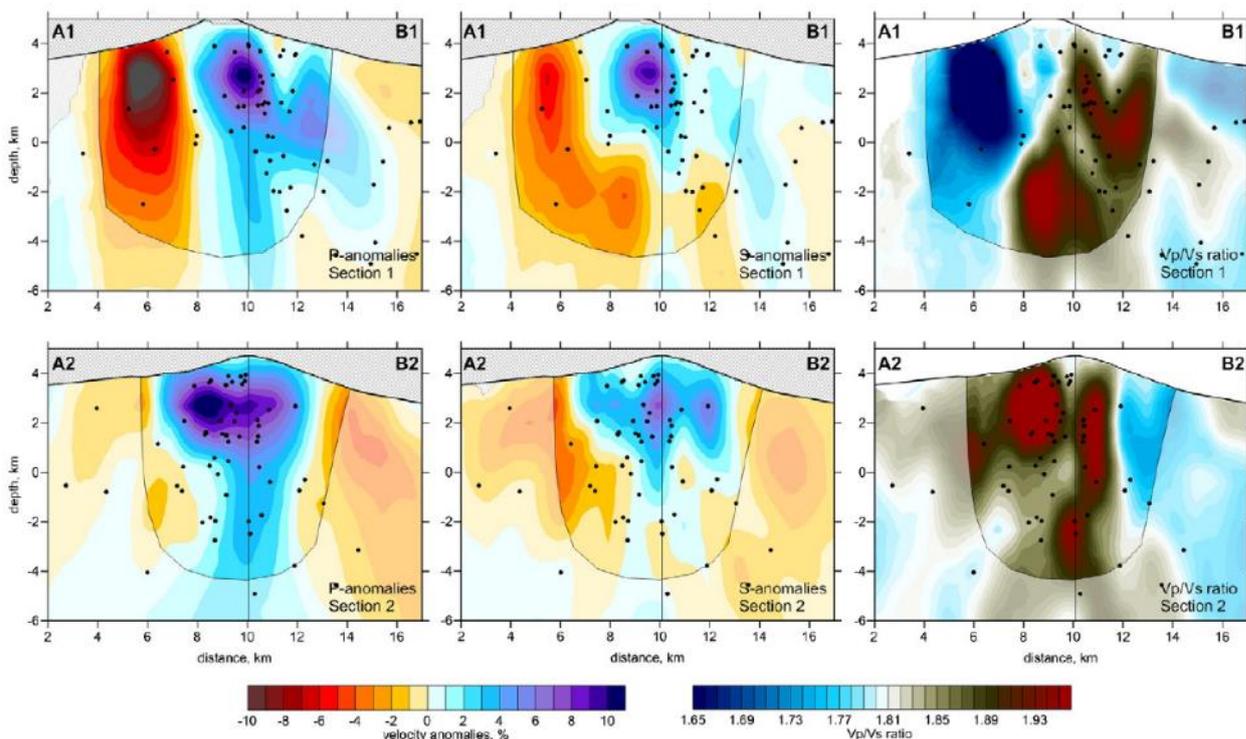


Рисунок 1.4 – Аномалии P и S-скоростей, и отношения V_p/V_s , рассчитанные в результате инверсии данных в двух вертикальных сечениях [Kuznetsov and Koulikov, 2014]. Область с низким разрешением затемнена. Черные точки – землетрясения на расстоянии менее 5 километров от профиля.

Также, при участии автора с использованием пассивной сейсмической томографии [Koulikov et al., 2014a], была получена сейсмическая модель коры под Кайнозойским базальтовым полем Харрат Лунайир, которое находится на северо-западе Саудовской Аравии. Необходимые данные были получены с временной сети станций, которая была установлена в данном регионе после появления сейсмической активности в апреле 2009 года. Изначально это позволило автоматически выделить вступления P-волн для 5700 событий [Hansen et al., 2013]. В этом исследовании данные были проанализированы повторно вручную для выделения более сильных землетрясений ($M > 3,2$). В результате удалось выделить 1879 событий и снять 8904 вступлений P-волн и 10579 вступлений S-волн. Полученные скоростные модели (Рисунок 1.6) в результате томографической инверсии хорошо коррелируют с геологическими особенностями региона. В верхних слоях зона положительной аномалии соответствует базальтовому полю, а отрицательные аномалии – это окружающие его осадочные бассейны. Ниже 6 километров от уровня моря была обнаружена

сильная отрицательная аномалия, которая идеально ограничивает узкий сейсмический кластер событий, наблюдаемый в 2009 году. Это позволяет предположить, что ниже 6 километров находится область, насыщенная расплавом, который поднимается вверх по трещинам/каналам и сталкивается с плотным базальтовым полем. Данный процесс приводит к трещинообразованию в верхнем слое и образованию событий на указанной границе. Также предполагается, что базальтовое поле в этот раз спасло регион от извержения.

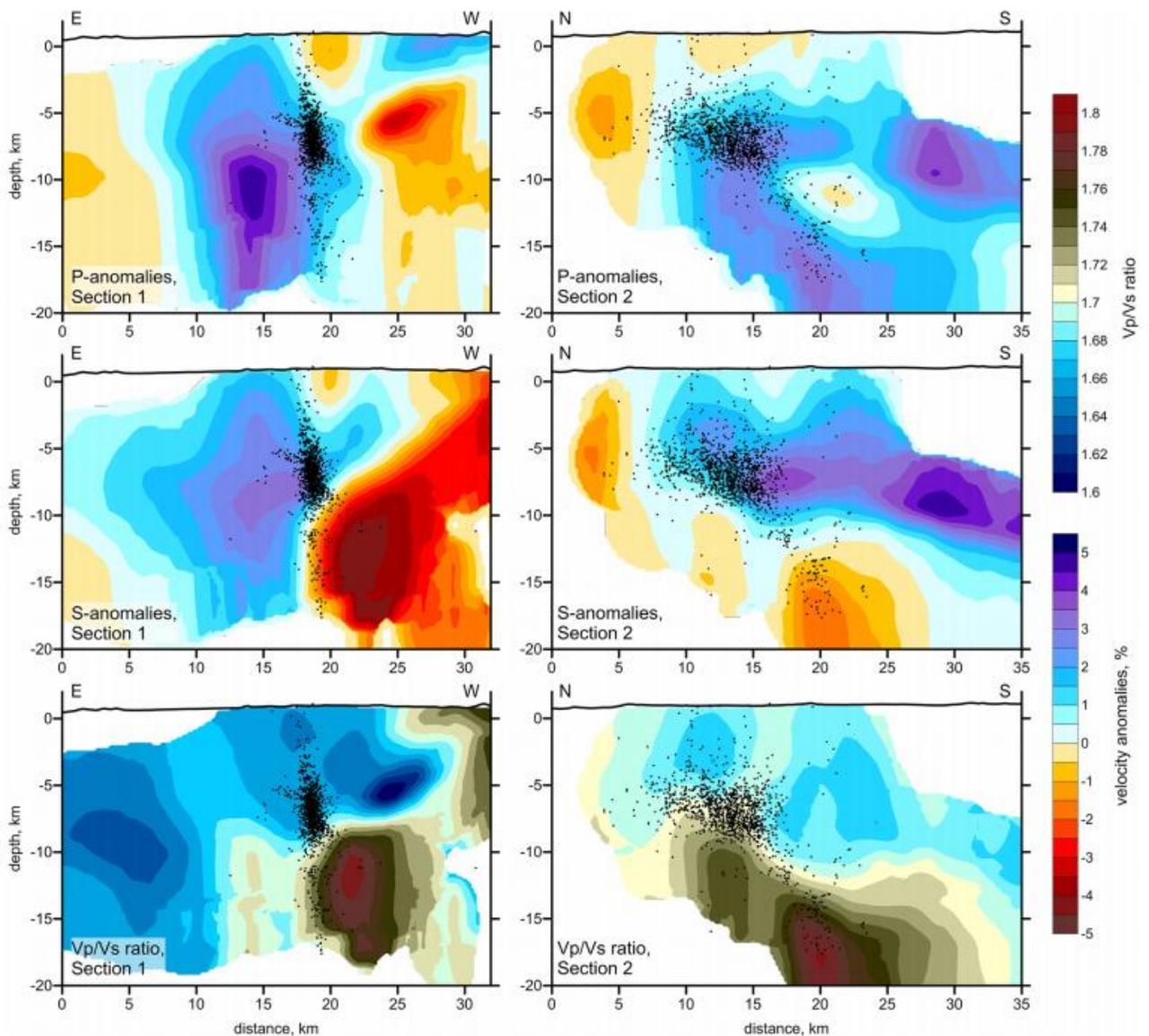


Рисунок 1.6 – Скоростные модели для P и S-волн, и отношения V_p/V_s (сверху вниз) [Koulakov et al., 2014a]. Черные точки – гипоцентры землетрясений.

Не менее интересными работами являются: анализ гидротермальной системы вулканического комплекса Тингиририка [Pavez et al., 2016], эксперимент «ТОМО-

ETNA» по изучению структуры земной коры под вулканом Этна [Luehr et al., 2017], исследование скоростных структур под вулканом Утурунку (Боливия) [Kukarina et al., 2017] и десятки других исследований. Такая популярность метода пассивной сейсмической томографии говорит, что метод хорошо зарекомендовал себя для изучения различных внутренних структур, в том числе и вулканов.

Метод эмиссионной томографии относится к классу методов направленного приема. Теоретическая основа метода заключается в гипотезе пространственной упорядоченности источников эндогенного сейсмического излучения. Общий принцип заключается в реконструкции пространственно-временного распределения меры когерентности сейсмического излучения, за счет суммирования подготовленных данных сейсмических станций со сдвигами, соответствующими заранее рассчитанному в априорной скоростной модели годографу, для каждого гипотетического положения источника в исследуемом объеме. Данная операция имеет смысл фокусировки волнового поля и позволяет получить максимумы сканируемого параметра в точках, расположенных вблизи фактических местоположений эмиттеров когерентного сейсмического излучения. Последовательное ее выполнение для непрерывных сейсмических данных, позволяет получить четырехмерное распределение выбранного параметра, которое можно рассматривать как изменяющееся во времени трехмерное изображение пространственного распределения сейсмического излучения.

Первые экспериментальные подтверждения возможностей использования шумовых сейсмических полей для исследования сейсмической эмиссии были получены в работах, проводимых группой NORSAR в Норвегии под руководством А.В. Николаева [Nikolaev and Troitskiy, 1987], и при исследовании магматического тела под северным Канто в Японии [Tchebotareva et al., 2000], которое позволило изучить магматическое тело в коре в районе Никко (северный Канто, регион острова Хонсю, Япония).

Метод эмиссионной томографии успешно применяется для изучения активных вулканов, где имеется сильный естественный сейсмический шум. Так в

работе [Abramenkov et al., 2016] по вулкану Горелый была обнаружена зона выделения сейсмической энергии, расположенная в окрестности главного кратера. Анализ сигналов от этих источников позволил предположить, что повышенное давление, создаваемое вулканической дегазацией, активирует ряд слабых источников близко к основному вулканическому каналу. В свою очередь анализ позволил изучить пространственно-временную эволюцию источников (Рисунок 1.7).

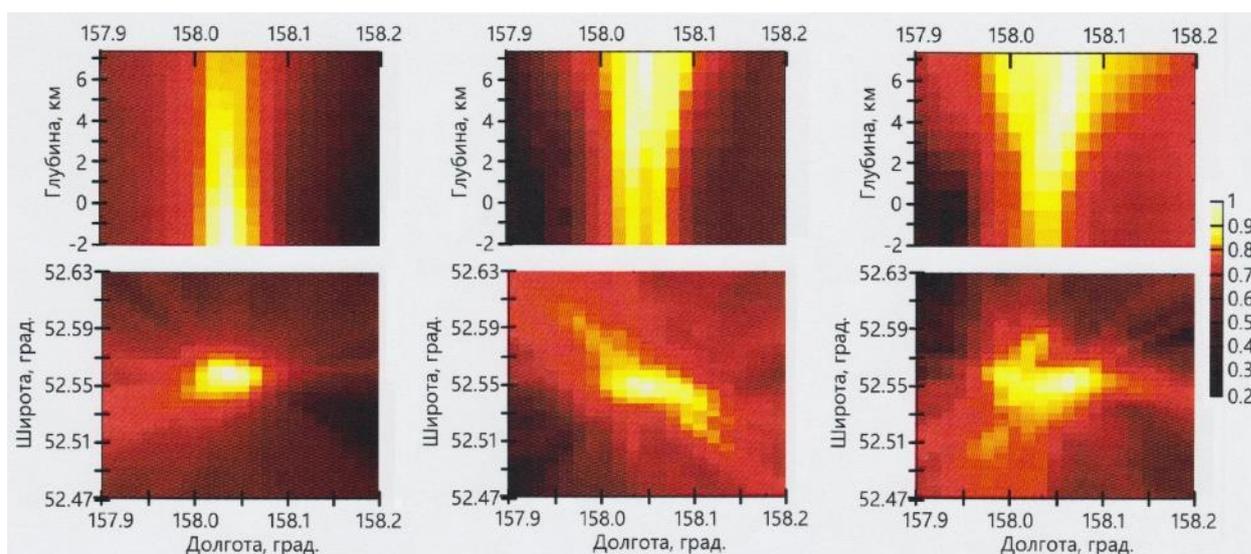


Рисунок 1.7 – Пространственное распределение нормированной суммарной энергии сейсмического излучения [Abramenkov et al., 2016] за периоды (слева на право): с 18.10.2013 по 24.10.13; с 12.01.2014 по 17.01.2014; с 12.03.2014 по 18.03.2014. Шкала – нормированное значение энергетической оценки.

Стоит упомянуть работу [Хогоев и Колесников, 2011] в которой представлено применение метода для изучения микросейсмичности в различных активных зонах и одной из них является окрестность кратера действующего грязевого вулкана «Гора Карabetова» (Таманский полуостров). Результаты исследования показали, что метод эмиссионной томографии эффективен для изучения геодинамических активных областей, а также позволили выделить зоны аномалий в области вулкана.

Шумовая поверхностно-волновая томография (ambient noise tomography) – основана на использовании сейсмического шума, который присутствует на записях всех сейсмических станций. Используемый шум генерируется от широкого спектра источников, как природных, например, океанический прибой

вдоль береговых линий, так и техногенных, например, транспорт и т.д. Суть метода заключается в том, что кросс-корреляционная функция случайного волнового поля, зарегистрированного в двух точках, определяет функцию Грина между этими точками [Lobkis and Weaver, 2001]. Если предположить, что «шум» образован главным образом поверхностными волнами, генерируемыми источниками, случайно распределенными по поверхности, то кросс-корреляционная функция шума дает возможность определить функцию Грина поверхностной волны от источника, находящегося в точке расположения одной станции, зарегистрированной на другой станции. Используя функцию Грина, можно получить дисперсионную кривую поверхностной волны между двумя станциями. При наличии большого количества регистрирующей аппаратуры имеется возможность накопить множество таких кривых и выполнить поверхностно-волновую томографию. В большинстве методов сначала от дисперсионных кривых для трасс между станциями производится переход к двумерным распределениям групповых скоростей на разных частотах. Далее строятся дисперсионные кривые в точках регулярной сетки, которые обращаются в трехмерное распределение скоростей S-волн.

Работа [Jaхybulatov et al., 2014], посвящённая известному супервулкану Тоба на Суматре в Индонезии. Данные для этого исследования были накоплены в 2008 году при установке 40 временных станций. Источником поверхностных волн Рэлея и Лява, необходимых для исследования, являлся шум воды вдоль береговых линий вокруг вулкана. Итогом работы стало выделение зоны радиальной анизотропии под вулканом, которая предположительно представляет из себя мелкомасштабное расслоение в коре ниже 7 километров, вызванное наличием множества горизонтальных слоев, заполненных расплавом (Рисунок 1.8).

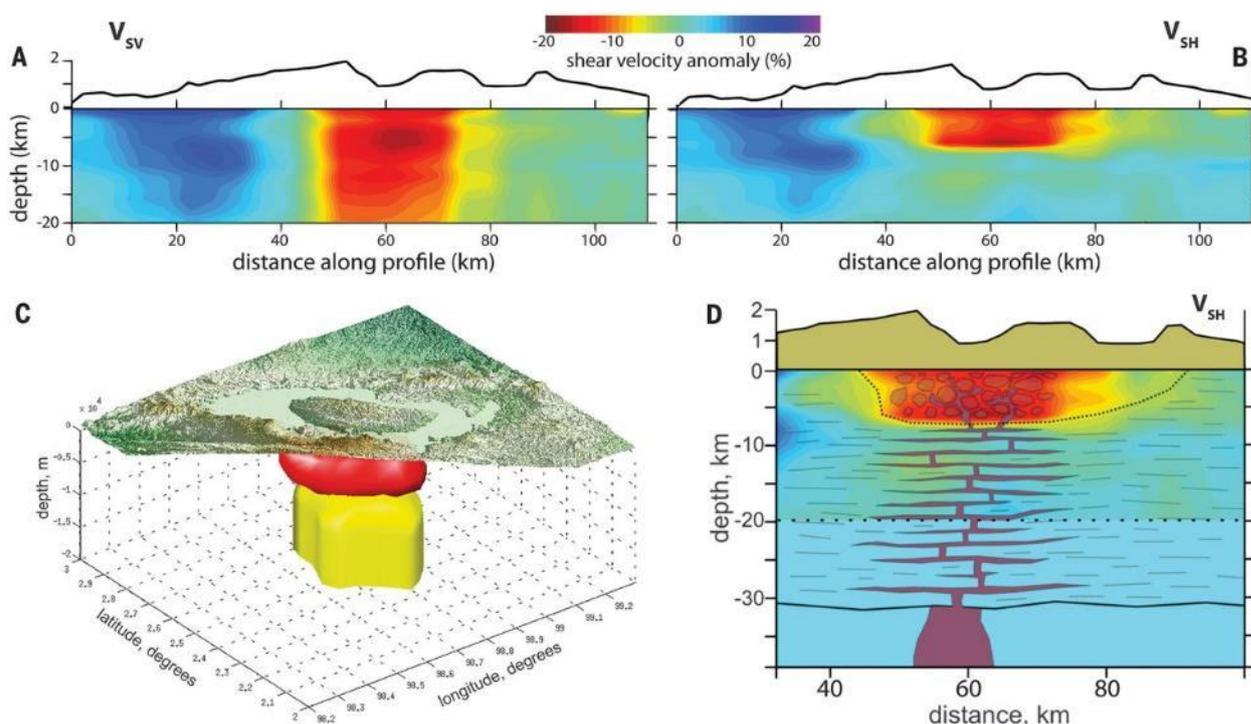


Рисунок 1.8 – Трехмерная скоростная модель под вулканом Тоба [Jaхybulatov et al., 2014]. (A) – вертикальный профиль распределения V_{sv} . (B) – вертикальный профиль распределения V_{sh} . (C) – трехмерное представление томографической модели. (D) – Схематическая интерпретация структуры под вулканом по полученным результатам.

С использованием этого метода проводилось исследование [Koulakov et al., 2014b], посвященное изучению Авачинской группы вулканов. Оно состоит из двух этапов обработки данных, в первом рассчитывалось двухмерное распределение групповой скорости волны Рэля, которые были в дальнейшем преобразованы в трехмерное распределение скорости поперечной волны. Второй этап, представлял из себя анализ профиля ГСЗ и получение сейсмических моделей. Результаты двух работ согласуются между собой и дополнительно подтверждаются результатами гравитационных и магнитотеллурических исследований.

Стоит упомянуть работу [Brenguier et al., 2007] в которой с помощью шумовой томографии исследовался базальтовый вулкан Питон-де-ла-Фурнез - действующий вулкан на юго-востоке острова Реюньон в Индийском океане. К сигналу, записанному на 21 станцию в течение 18 месяцев, была применена методика кросс-корреляции шума для выделения функции Грина для поверхностной волны Рэля. Реконструкция производилась для каждой пары

приемников. В результате удалось получить трехмерную модель скорости распределения S-волн от +2 до -1 километра относительно уровня моря.

1.3 Исследования вулканов схожих с вулканом Горелый

На нашей планете находится большое количество вулканов и все они по-своему уникальны, но большинство из них можно объединить в группы по ряду общих характеристик. Например, среди выделяемых черт вулкана Горелый стоит отметить: высокий уровень дегазации и большую сейсмоактивность под ним. В данной главе будут представлены работы с использованием методов сейсмической томографии для вулканических объектов с высоким уровнем дегазации. Анализ работ позволит оценить целесообразность и актуальность используемого метода при его применении к сложным и постоянно меняющимся объектам. Обобщение результатов внутреннего строения похожих вулканов, вероятно, позволит выделить общие физические процессы в их геологических структурах.

Вулкан Спурр (Mt. Spurr) - самый высокий действующий вулкан Аляски и входящий в состав вулканов Алеутской дуги, его высота составляет 3374 метра [Nye C. J. and Turner D. L., 1990]. Он находится всего в 130 километрах к западу от крупнейшего города Аляски, Анкориджа, поэтому из-за извержений в 1953 [Juhle and Coulter, 1955] и 1992 [Bluth et al., 1995] годах город был покрыт пеплом. Стоит отметить, что под вулканом наблюдается постоянная сейсмоактивность, но обычно события происходят не глубже 10 километров, однако в периоды извержений, землетрясения наблюдаются до глубин 35 километров [Koulakov et al., 2013]. В 2004-2005 годах на вулкане наблюдалась высокая фумарольная активность [Coombs et al., 2006]. Для изучения внутренней структуры вулкана и его процессов, сейсмическую сеть наблюдения увеличили до 26 станции, которые записывали данные с июня по сентябрь 2015 года. В этот период удалось зарегистрировать 512 землетрясений в коре [Dixon et al., 2006], что позволило выделить 5960 вступлений P-волны и 4973 вступлений S-волны для проведения

томографической инверсии [Koulakov et al., 2013]. Основными результатами томографии стали модели отношения V_p/V_s для двух горизонтальных и одного вертикального сечений (Рисунок 1.9).

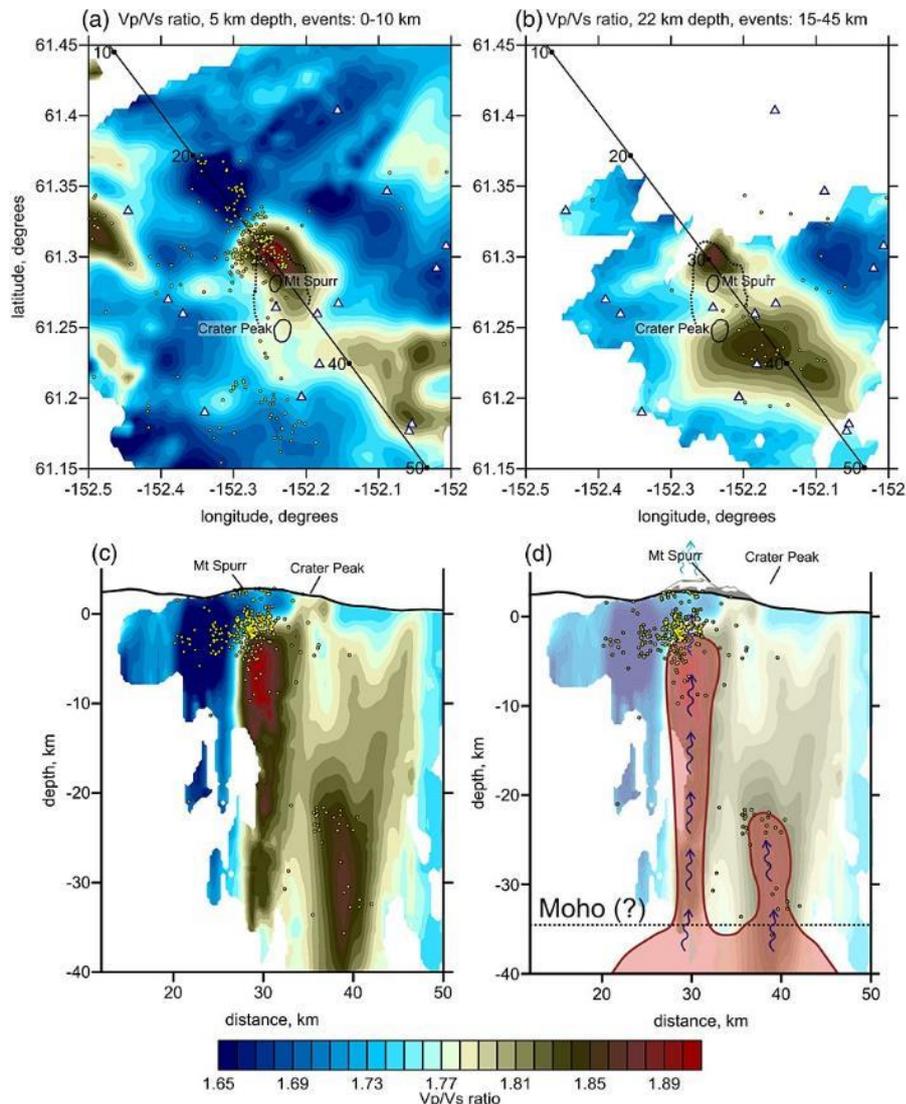


Рисунок 1.9 – Результаты томографии [Koulakov et al., 2013]. Два верхних рисунка – горизонтальные сечения на глубине 5 км (а) и 22 км (б). Желтые точки – землетрясения: (а) – на глубинах 0-10 км; (б) – на глубинах 15-45 км; (с) – проекция всех землетрясений на вертикальный профиль. Черная линия – профиль для построения вертикального сечения.

В первую очередь, авторы выделяют аномалии с высокими значениями V_p/V_s , около 1.9. Первая расположена под северным краем вулкана и начинается с глубины 5 км ниже уровня моря, и совпадает верхним скоплением сейсмичности. Вторая аномалия находится в нескольких километрах к юго-востоку от «Crater Peak» и начинается с глубины 22 км, что совпадает с глубинным скоплением землетрясений.

Как отмечают авторы, наиболее важными результатами являются две аномалии в виде пальцев, с высоким значением продольных скоростей и падением значений поперечных скоростей, что и приводит к высокому значению V_p/V_s . Это может быть объяснено наличием жидкостей/расплавов под вулканом, которые по каналам или трещинам поднимаются на поверхность. Северная аномалия совпадает с наличием фумарол и местом выброса газов, а на глубине 5 км виден переход от высокого значения V_p/V_s к низкому, что, скорее всего, обуславливается заполнением трещин/каналов уже не жидким флюидом, а газом. Более того, граница перехода вещества из одного состояния в другое характеризуется скоплением сейсмичности на границе аномалий, что объясняется разрушением вышележащих структур быстро поднимающимся газом. По результатам томографии, вторая аномалия не поднимается выше 20 километров, и ее верхняя граница также характеризуется сейсмичностью.

Другой вариант возникновения сейсмичности заключается в разрушении породы в коре за счет расширения и скопления летучих веществ под действием высоких температур и давления. Данная гипотеза, возможно подтвердится, в будущих исследованиях.

Вулкан Невадо-дель-Руис, Колумбия, один из опаснейших вулканов на планете - его высота составляет 5311 метров. Он относится к Андийскому вулканическому поясу и находится в 40 километрах севернее города Манисалес. Вулкан сохраняет активность уже около 2 млн лет, а основной характер извержений выражается газовой-каменными пирокластическими потоками, которые в свою очередь вызывают грязевые потоки – лахары. История отмечает небольшие грязевые потоки, сошедшие после извержений в 1595 и 1845 годах, но крупнейший лахар сошел в 1985 году, он почти полностью разрушил городок Армеро и привел к гибели около 23000 жителей [Naranjo, et al., 1986]. В настоящее время, в связи с высокой опасностью и угрозой для населения, вулкан Невадо-дель-Руис находится под постоянным контролем властей и научного сообщества. С начала 2010 года вулкан переходит в фазу высокой активности, что

выражается интенсивной сейсмичностью, поверхностными деформациями и выделением огромного количества газов. По некоторым данным выброс SO_2 достигал 30 килотонн в сутки, а общий объем производства SO_2 , в период с 2012 по 2015 годы, составил $7 \cdot 10^6$ тонн [Servicio Geologico Colombiano, 2016].

В 2017 году учеными была сделана масштабная работа, по изучению внутренней структуры вулкана Невадо-дель-Руис методом пассивной сейсмической томографии [Vargas et al., 2017]. Авторами были исследованы свойства вулкана, путем его изучения в разные временные интервалы. Для выявления изменений скоростной структуры вулкана, были выбраны три пары временных интервалов: 2011-2012 (эталонный период) сравнивали с 1998-2010, 2013-2014 и 2015-2016. Такой выбор был обусловлен количеством доступных данных и особенностями вулканической активности. Для каждой пары интервалов искались наиболее близкие друг к другу станции, события и траектории лучей.

Результатами томографии стали трехмерные модели для четырех временных периодов (Рисунок 1.10). Главной особенностью, авторы работы, выделяют аномалию с высокими значениями V_p/V_s под вершиной. Для интервала 1998-2010 значения были больше 2.2. Данная картина объясняется повышением Р-скоростей и в то же время понижением скоростей S-волн. Скорости Р-волн более чувствительны к составу пород, а скорости S-волн сильно зависят от присутствия жидкости или газа в трещинах/порах. Сильная аномалия наблюдается в период 1998-2010, в период 2013-2014 ее размер и амплитуда значительно уменьшаются, а в период 2015-2016 снова становится заметной, примерно таких же размеров и амплитуды, что и в самый ранний период. По результатам также видно, что аномальная зона совпадает с распределением сейсмичности под вулканом.

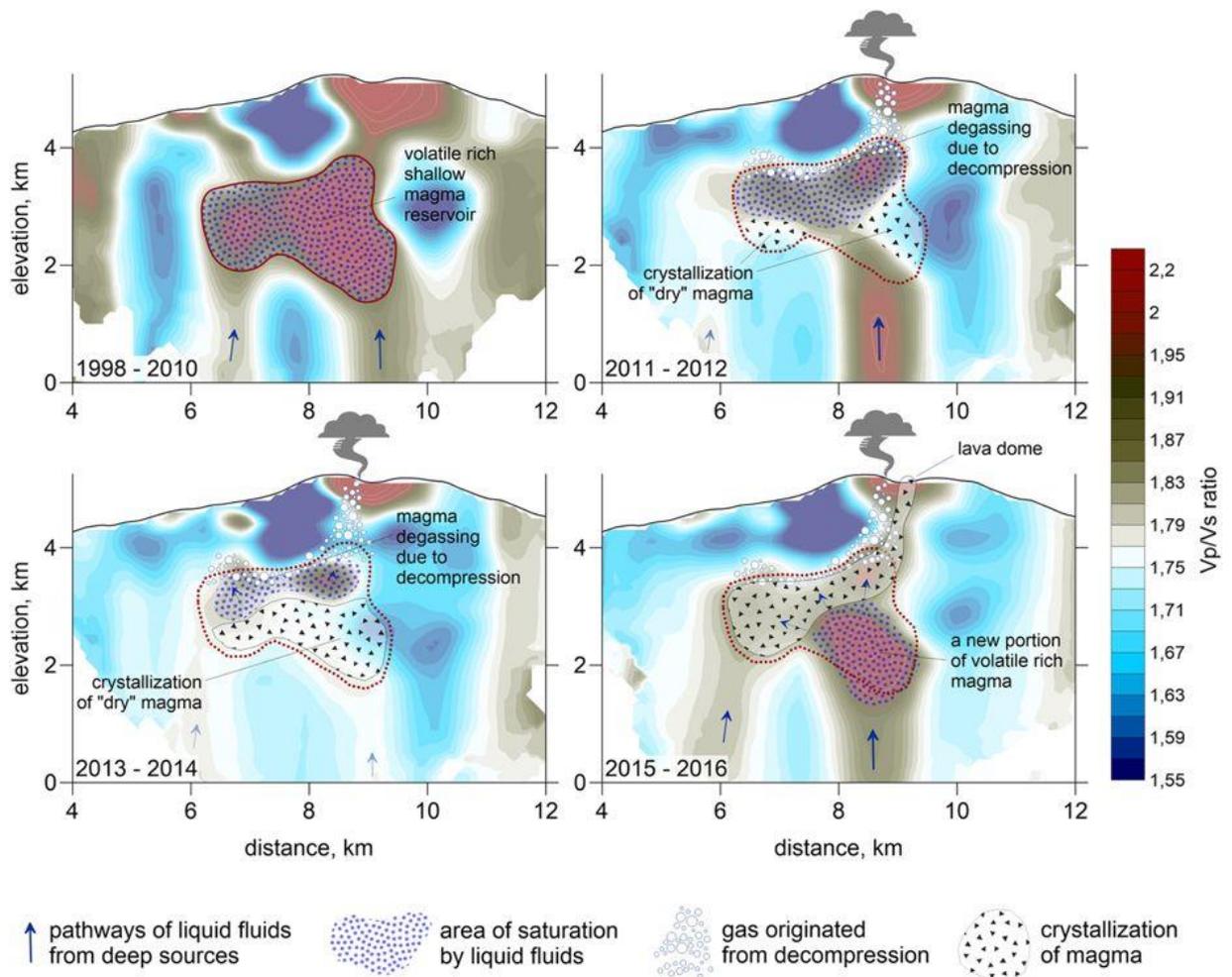


Рисунок 1.10 – Интерпретация результатов, полученных в исследовании [Vargas et al., 2017].

Аномалия с высокими значениями V_p/V_s под вулканом объясняется наличием магмы в мелком резервуаре, которая сильно насыщена летучими веществами. Верхняя граница аномалии находится на глубине ~ 2 километра от поверхности вулкана и остается на том же месте во всех наблюдаемых периодах. В отличие от нее, нижняя граница аномалии смещается, это видно в период 2011-2014. Быстрые изменения в значениях V_p/V_s обусловлены миграцией жидкостей/газов в магматическом резервуаре.

В начальный интервал времени, когда значение V_p/V_s было наибольшим, наблюдалась умеренная фумарольная активность, что позволяет предположить, что аномалия вызвана магмой, насыщенной летучими компонентами, и газом. В период 2012-2014 наблюдается уменьшение аномалии, в то время как на поверхности вулкана наблюдаются существенные выбросы газов. Отвод газа

должен обеспечиваться газовыми пузырьками, проходящими через магму, что подразумевает рост дегазированной области в основании резервуара, что в свою очередь согласуется с уменьшением размера аномалии с повышенными значениями V_p/V_s . Наблюдения на вулкане указывают на постепенное повышение пластового давления, о чем свидетельствует деформация внутри и вокруг кратера, сопровождаемое сильной дегазацией до 2015 года. Магматическое извержение в 2015 году, вероятно привело к снижению пластового давления, что в свою очередь поспособствовало пополнению резервуара магмой из более глубокого источника [Stix et al., 2003]. Поэтому в период 2015-2016 в нижней части резервуара появляются новая аномалия с высоким значением отношения V_p/V_s . Предполагается, что этот процесс может быть периодичен, и имеет фазу накопления магмы и фазу выделения газа. Фазы с наибольшим количеством флюидов, которые связаны с наиболее высокими значениями V_p/V_s , могут привести к взрывному извержению.

Стоит также упомянуть такие работы, как изучение трехмерной скоростной структуры вулкана Галерас [Vargas and Torres, 2015], исследование Флегрейских полей, на наличие газовых коллекторов, гидротермальных бассейнов и систем питания [De Siena et al., 2010], а в работе [Chatterjee et al., 1985] изучаются вариации значения V_p/V_s в регионе Йеллоустонского национального парка.

Анализ литературы в данной главе показывает, что методы сейсмической томографии актуальны для изучения активных вулканов. Работа с такими объектами осложняется их постоянно меняющейся внутренней структурой, наличием тремора, взрывов и извержениями, за счет чего становится трудным выделение полезного сигнала. Однако множество вышеупомянутых работ доказывают, что это возможно, а получаемые результаты говорят о хорошем качестве и точности метода.

1.4 Вулканизм Камчатки

Вулкан Горелый расположен на полуострове Камчатка и приурочен к Курило-Камчатской зоне субдукции. Ниже приведена информация о строении этой зоны субдукции, что необходимо для понимания глубинных источников питания Горелого и других вулканов Камчатки.

Камчатка — это полуостров в северо-восточной части Евразии, который вытянут с северо-востока на юго-запад. Его длина составляет 1200 километров, а максимальная ширина равняется 440 километрам. Общая площадь составляет примерно 270 тысяч км². На западе Камчатка омывается Охотским морем, а на востоке - Беринговым морем и Тихим океаном. Восточная сторона полуострова имеет множество заливов (Кроноцкий, Камчатский и др.) и бухт (Авачинская и др.). Такое строение обусловлено долгим процессом формирования Курило-Камчатской дуги (см. ниже). Вдоль Камчатки проходят два практически параллельных друг другу хребта - Срединный хребет и Восточный хребет, образуя между собой Центрально-Камчатскую низменность, где течет река Камчатка.

Полуостров Камчатка входит в состав Курило-Камчатской островной дуги и покрывает ее северную часть. Длина Курило-Камчатской дуги составляет порядка 2000 километров и в ней находятся около 68 активных вулканов, то есть примерно 12% от всех активных вулканов на Земле. В свою очередь, Курило-Камчатская дуга входит в состав Тихоокеанского вулканического огненного кольца (Рисунок 1.11). Тут сконцентрированы порядка 90% землетрясений, которые ежегодно происходят на нашей планете и, по разным данным, 70-75% наиболее активных вулканов.

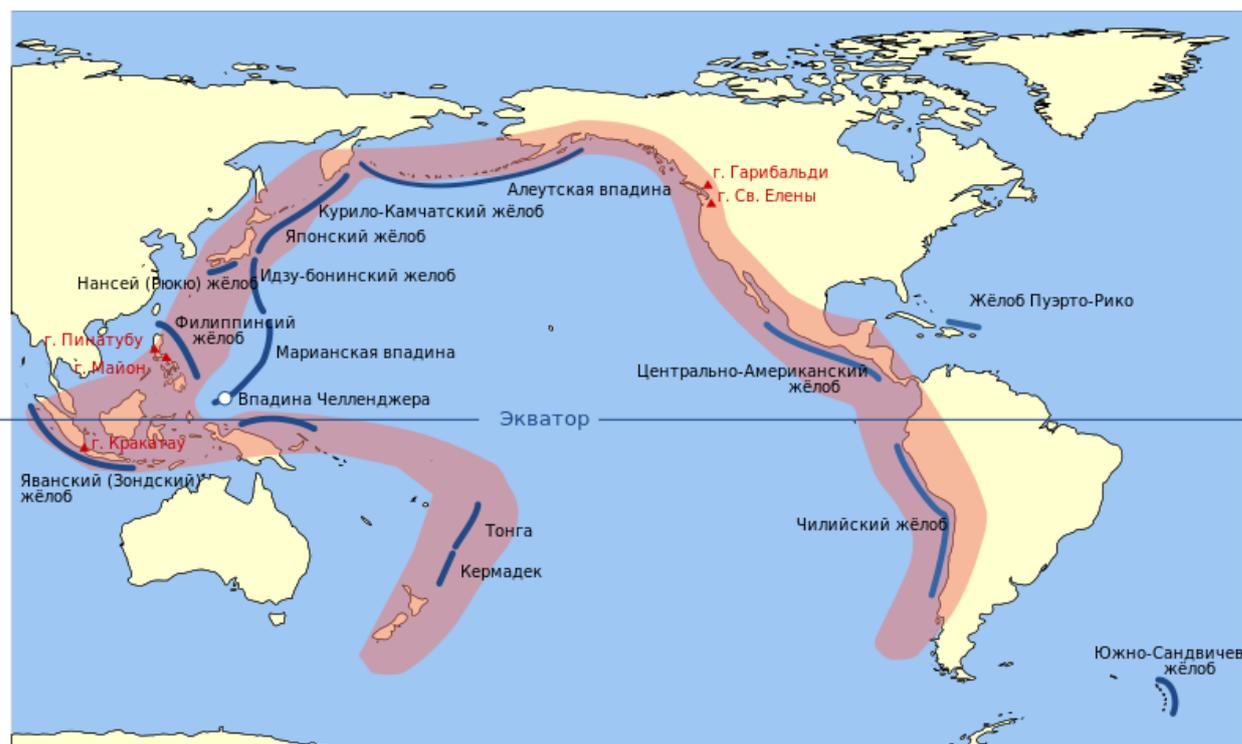


Рисунок 1.11 – Тихоокеанское вулканическое огненное кольцо, отмечено красным цветом. Источник - wikipedia.org.

На полуострове Камчатка находятся наиболее крупные, активные и мощные вулканы Курило-Камчатской дуги, которые делятся на три пояса неоген-четвертичного вулканизма: Восточный вулканический пояс, протягивающийся до юга полуострова и Северных Курил; Ключевской пояс, включающий группы вулканов Шивелуча, Ключевскую и вулкан Кизимен; пояс Срединного хребта [Добрецов и др., 2012]. Количество активных вулканов, у которых наблюдается признаки сейсмоактивности, варьируется из года в год, но в среднем составляет 30. Стоит также отметить, что на Камчатке находится самый большой действующий вулкан Евразии – Ключевской, высотой 4750 метров. Объемы продуктов извержения этого вулкана в среднем составляют 60 млн. тонн в год.

Вулканы на полуострове приурочены к Курило-Камчатской вулканической дуге, которая образовалась в результате субдукции Тихоокеанской океанической плиты под Охотскую континентальную плиту. Скорость субдукции варьируется, от 75 мм/год в северной части дуги до 83 мм/год на юге. Разделяют три основных сегмента Курило-Камчатской дуги: Камчатский – субдукция происходит под

крупный континентальный блок, Северо-Курильский и Южно-Курильский (Рисунок 1.12).

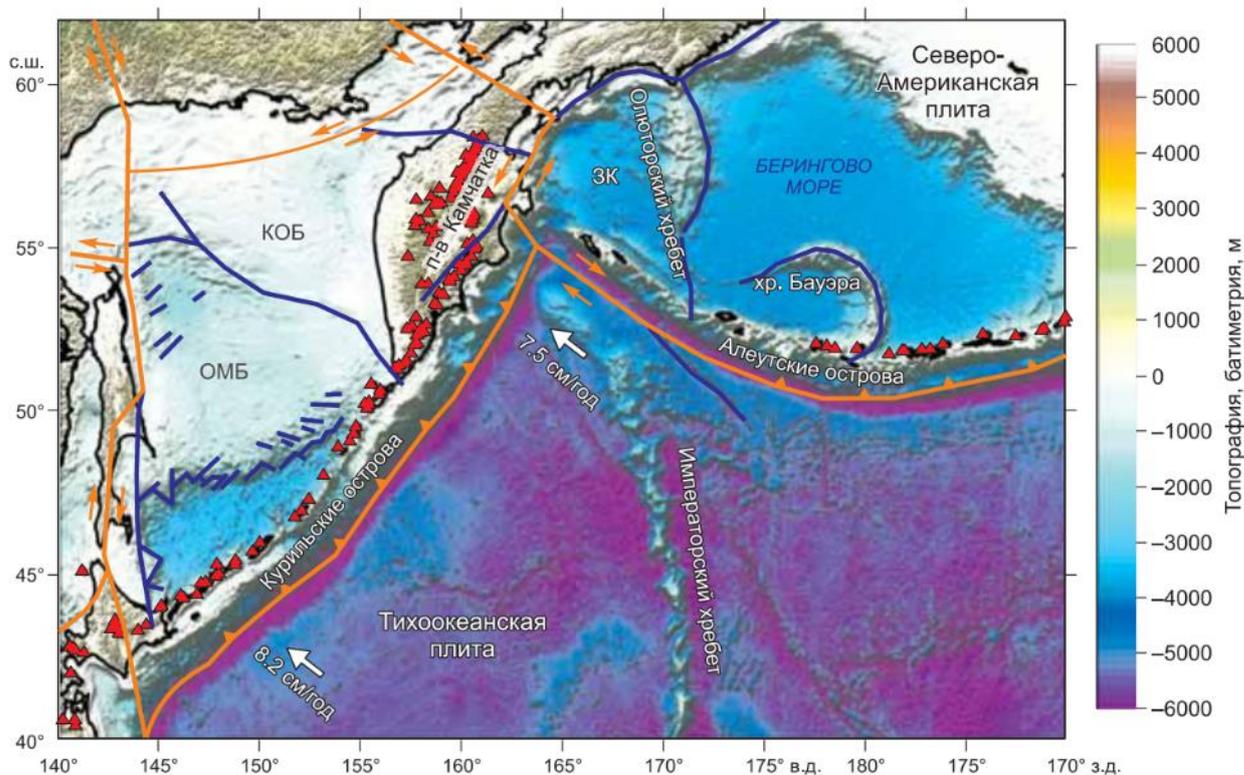


Рисунок 1.12 – Топографическая карта северо-западной части Тихого океана. Оранжевые и фиолетовые линии – границы тектонических плит [Кулаков и др., 2011]. Скорости движения тихоокеанской плиты из [Avdeiko et al., 2007]. Красные треугольники – активные вулканы. ЗК – Западная котловина; КОБ – Камчатко-Охотский блок; ОМБ – Охотоморский блок; ЮОБ – Южно-Охотская впадина.

Образование Камчатской вулканической дуги связано с поворотами Тихоокеанской плиты 45 и 30 млн лет назад, которые привели к перестройке задуговых бассейнов и зон субдукции в интервале 15-20 млн лет назад [Гордеев и др., 2017]. Начиналось все с коллизии, столкновения Озерновско-Валагинской островной дуги с Камчатской, которое датируется около 55 млн лет назад [Соловьев, 2008]. Следующими важными датами являются рубежи 40, 30 и 15 млн лет, которые описывают этапы сближения с Кроноцкой дугой [Соловьев и др., 2004]. Начиная от 15 млн лет и до 7 млн лет назад, структура восточной части Камчатки значительно меняется, образуются бухты, что связано с процессом коллизии с Кроноцкой дугой [Соловьев, 2008]. В своем современном виде

Камчатская вулканическая дуга сформировалась в конце миоцена – начале плиоцена [Леглер, 1977; Авдейко и др., 2002].

Сложный и энергетически мощный процесс субдукции сопровождается большим количеством землетрясений. В мире более 75% событий, в том числе с $M > 7$, приходится на зоны субдукции, в первую очередь Тихоокеанской плиты [Ландер и др., 1994; Maskey et al., 1997]. Также стоит отметить, что на территории Камчатки происходит множество мелкофокусных землетрясений, не относящихся к зоне субдукции и происходящие в центральных районах полуострова [Гордеев и др., 2006]. Карта землетрясений представлена на Рисунке 1.13.

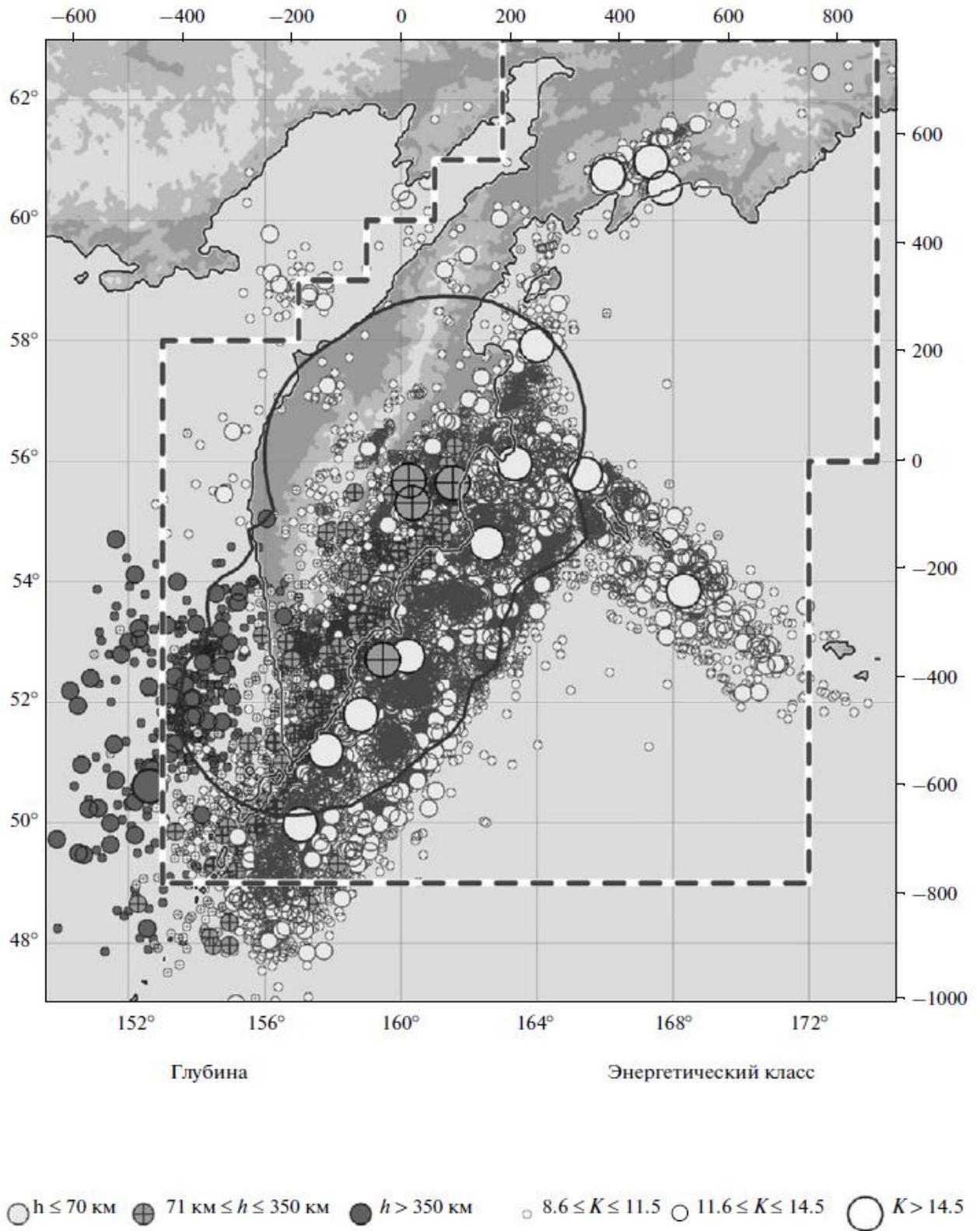


Рисунок 1.13 – Карта эпицентров землетрясений Камчатки, Командорских островов и прилегающих территорий за период с 1962 г. по март 2011 г. [Гордеев и др., 2006]: пунктирная линия – граница зоны ответственности сети КФ ГС РАН; сплошная – изолиния $K_{\min} = 8.5$ для сети 2007 г.

Исследование зон субдукции с помощью методов томографии позволяет изучить форму погружающегося слэба, определить распределение сейсмичности, связанной со сложными физико-химическими процессами и предположить механизмы процессов, протекающих при субдукции. Обработка землетрясений и анализ их механизмов [Gorbatov et al., 1997] позволил определить форму слэба по распределению сейсмичности. Такие исследования, как [Bijwaard et al., 1998; Grand, 2002; Zhao, 2004] по региональным и глобальным моделям, показывают, что с помощью сейсмической томографии можно получить качественные и однозначные изображения слэба под различными зонами субдукции. Одна из ранних работ по изучению зоны субдукции под Камчаткой [Gorbatov et al., 1999] использовала 5270 региональных событий, записанных на 32 сейсмостанциях, что позволило построить скоростные модели Р-волн до глубины 200 км и определить, что средняя толщина подвигающейся Тихоокеанской плиты составляет 70 километров. В более поздней работе, на базе региональной томографической инверсии с использованием данных глобальных сейсмологических каталогов построена трехмерная модель сейсмических неоднородностей скоростей Р и S-волн до глубины 1100 км под Курило-Камчатской и Алеутской зонами субдукции [Кулаков и др., 2011]. На основании полученной в этой работе модели была построена параметрическая модель слэба вплоть до глубины 900 км (Рисунок 1.14).

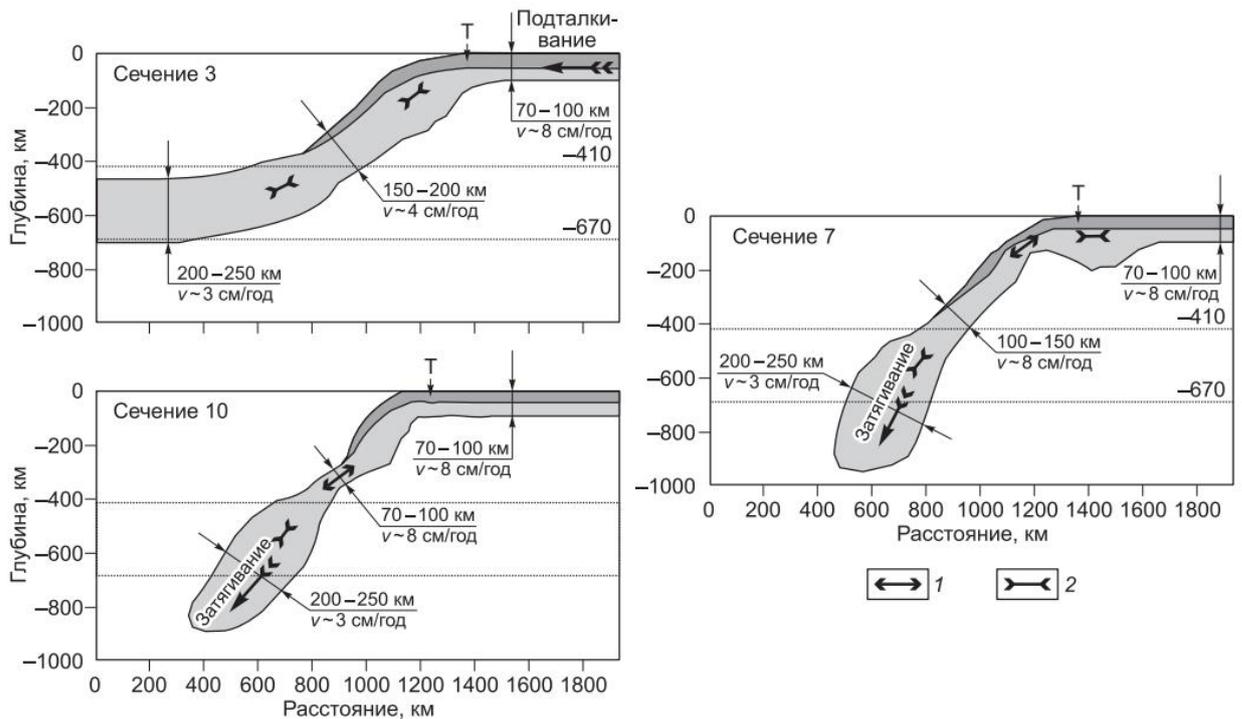


Рисунок 1.14 – Схематическое изображение слэба на вертикальных сечениях [Кулаков и др., 2011]. Даны примерные оценки толщины и скорости. Т - обозначает положение желоба. Темная часть слэба, в теории, более прочная. 1 — растяжение, 2 — сжатие.

В связи с наличием большого количества активных вулканов на полуострове Камчатка, значительная часть зарегистрированной сейсмичности в этом регионе связана именно с вулканическими процессами, а не тектоникой.

1.5 Объект исследования – вулкан Горелый

Вулкан Горелый расположен в 75 км к юго-западу от города Петропавловск-Камчатский и составляет единую систему вместе с вулканом Мутновский (Рисунок 1.15). В строении вулкана учувствуют две постройки – древняя и современная. Древняя постройка имеет щитообразную форму, в ее центре находится кальдера размером 13×12 километров, которая образовалась в результате крупного эксплозивного извержения, произошедшего 33.6 тысячи лет назад и выбросившего около 100 км³ вулканического материала [Braitseva et al., 1995]. Поверхность древнего вулкана практически полностью состоит из спекшихся туфов и пемзы андезитового и андезит-дацитового состава. Этот материал четко прослеживается от центра к периферии на расстояния до 15-20

километров, а мощность покрова достигает 15-30 метров на бортах кальдеры [Кирсанов и Мелекесцев, 1991; Селянгин, 2016].

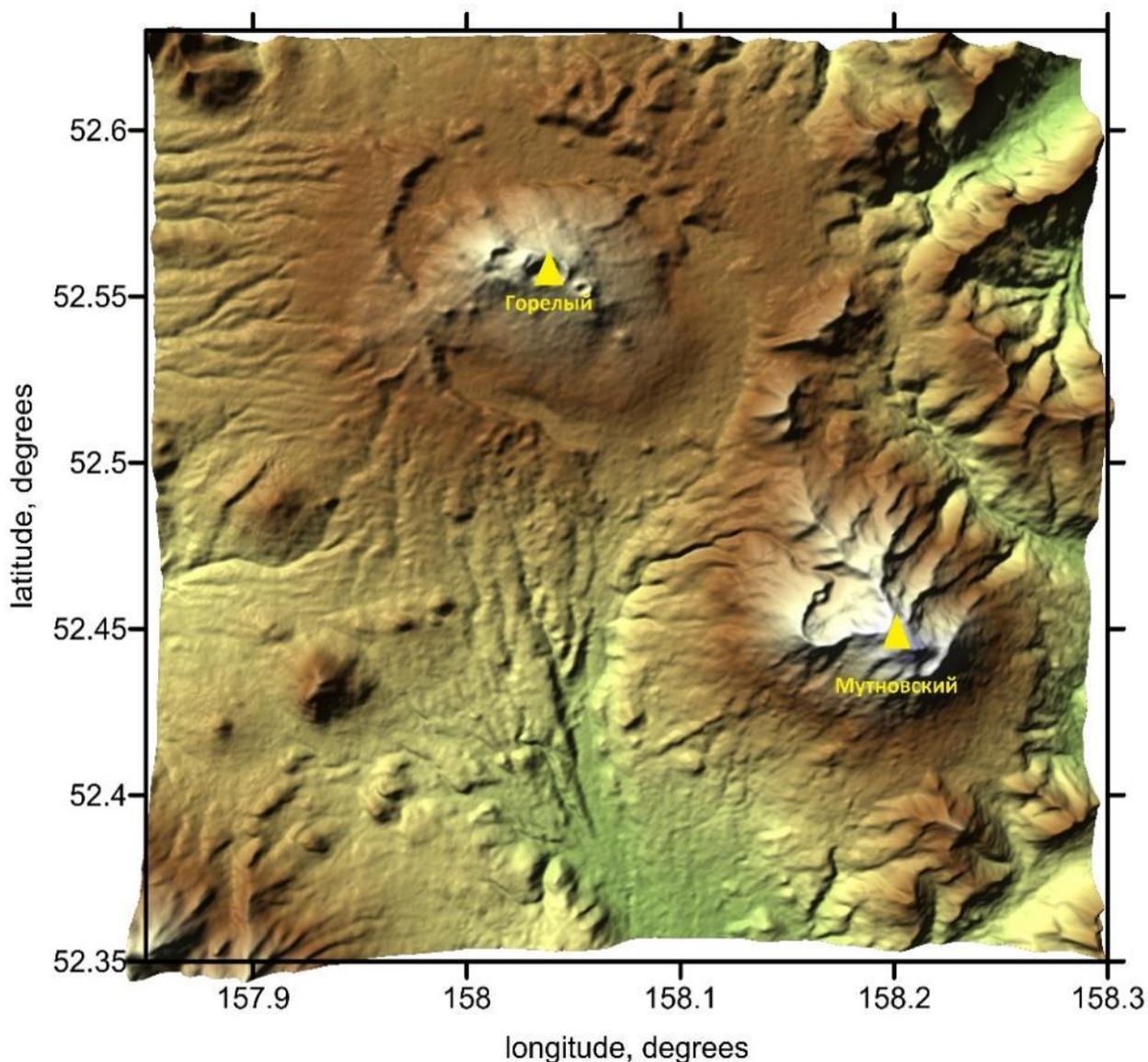


Рисунок 1.15 – Карта региона Мутновской группы вулкана. Вулкан Горелый и Мутновский изображены желтыми треугольниками. Четко выраженная кальдера вокруг вулкана Горелый имеет размер 13х12 километров.

Современная постройка представляет собой крупный щитовой вулкан высотой 1829 метров и объемом около 25 км³, которая начала формироваться в позднем плейстоцене. Она занимает центральную часть кальдеры и представлена тремя слившимися конусами, вытянутыми в виде хребта с северо-запада на юго-восток. В общей сложности на вулкане насчитывается 11 кратеров, наложенных друг на друга, и около 40 прорывов различной величины, распределенных по склонам. Породы, которыми сложена постройка, представлены базальтами и

андезит-базальтами [Кирсанов и Мелекесцев, 1991]. Детальная геологическая карта вулкана Горелый, кальдеры и области вокруг него, которая представлена в работе [Селянгин и Пономарева, 1999; Абросимова, 2013], изображена на Рисунке 1.16.

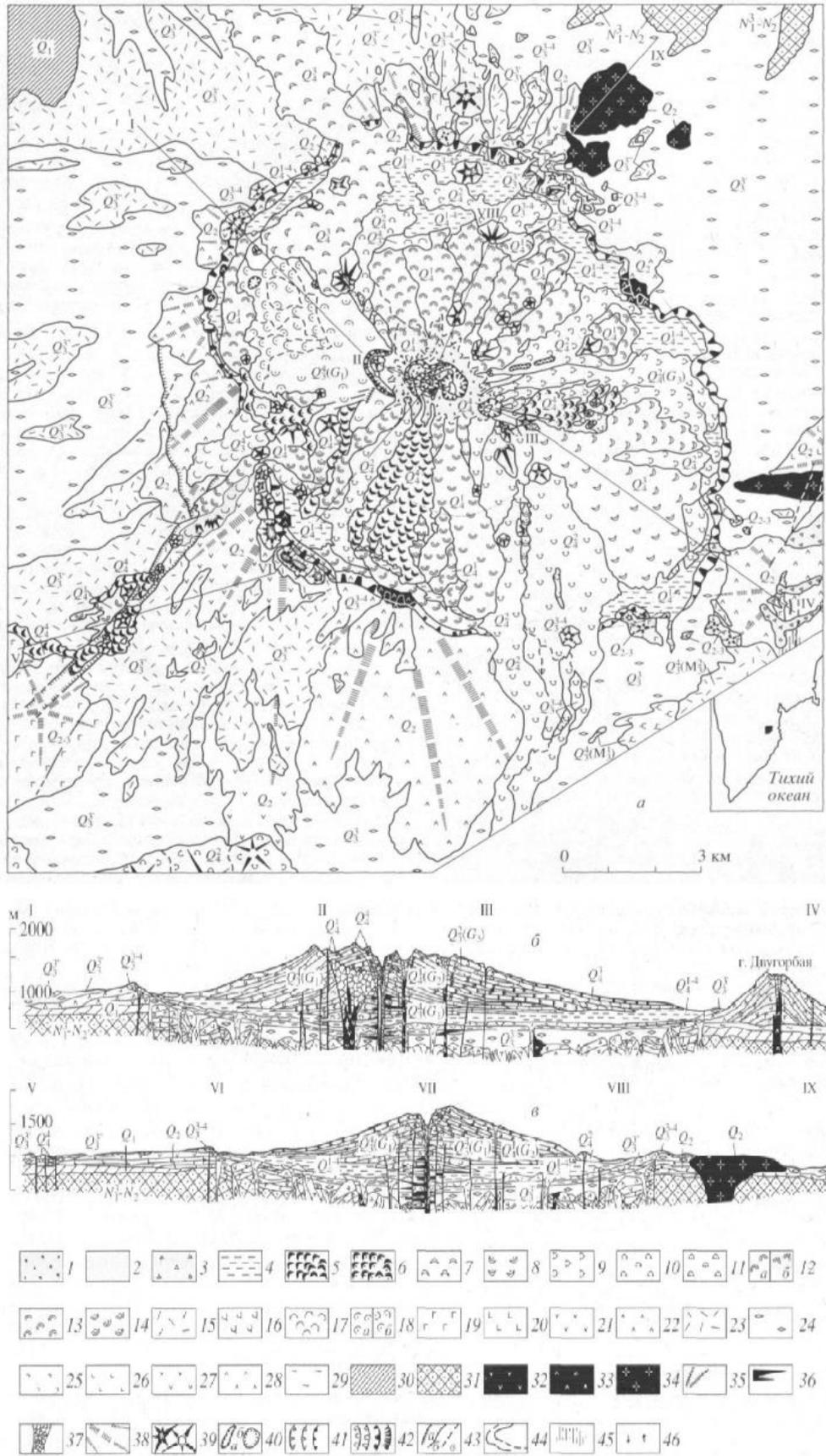


Рисунок 1.16 – Геологическая карта вулкана Горелый [Селянгин и Пономарева, 1999; Абросимова, 2013]: горизонтальное сечение и вертикальные сечения по профилям I-IV и V-IX. Современные и нерасчлененные позднплейстоцен-голоценовые отложения: 1 –

пеплы, глыбы и шлаки последних извержений вулкана; 2 – аллювий; 3 – отложения обвалов, селей, лахаров; 4 – комплекс водно-ледниковых, аллювиально-пролювиальных и озерных отложений с прослоями вулканических пеплов и шлаков ($Q_3^4 - Q_4^4$). Поздний голоцен (Q_4^4 , 2.6 тыс. лет назад – ныне): 5, 6 – соответственно андезитобазальты и андезиты последней серии эффузивных извержений вулкана (XVIII в.). Средний голоцен (Q_4^3 , 5-2.6 тыс. лет назад): 7 – андезитобазальты; 8 – андезиты. Ранний голоцен (Q_4^2 , 8-5 тыс. лет назад): 9 – базальты; 10 – андезитобазальты; 11 – андезиты. Древний голоцен (Q_4^1 , 11-8 тыс. лет назад): 12 – лавы (а) и шлаки (б) базальтов; 13 – андезитобазальты; 14 – андезиты. Верхи позднего плейстоцена (Q_3^4): 15 – пемзы и пемзовые туфы вершинной кальдеры вулкана Мутновский-III (M_3^2); 16 – базальты; 17 – андезитобазальты; 18 – андезитовые лавы (а) и агломераты-агглютинаты (б). Поздний плейстоцен (Q_3^{3-4}), комплекс ранее-посткальдерных моногенных вулканических аппаратов и продуктов их деятельности: 19 – базальты; 20 – андезитобазальты; 21 – андезиты; 22 – дациты. Поздний плейстоцен (Q_3^3): 23 – дацитовые пемзы заключительного этапа кальдероформирующих извержений ($Q_3^{3''}$); 24 – дацитовые, андезиодацитовые и андезитовые пемзы и игнимбриты главного периода кальдерообразующих извержений Гореловского центра ($Q_4^{3'}$). Средний плейстоцен (Q_2), породы докальдерного комплекса пра-Горелого и соседних вулканов: 25 – базальты; 26 – андезитобазальты; 27 – андезиты; 28 – дациты. Ранний-средний плейстоцен (Q_{1-2}): 29 – дацитовые игнимбриты (на разрезе I-IV). Ранний плейстоцен (Q_1): 30 – лавовые покровы (базальты – андезитобазальты) и останцы стратовулканов (базальты – андезиты). Поздний миоцен – плиоцен ($N_1^2 - N_2$): 31 – слабодислоцированная толща контрастных, базальтоидных и кислых вулканитов с экструзиями биотит-роговообманковых риолитов (алнейская серия). Породы экструзий: 32 – базальты; 33 – дациты; 34 – риолиты; 35 – дайки; 35 – силлы (на разрезах); 37 – эруптивные брекчии жерловин; 38 – останцы древних разрушенных вулканов; 39 – шлаковые конусы, молодые и частично разрушенные ранние; 40 – лавовые блоки (а) и воронки фреатических взрывов (б); 41 – гребни кратеров (от древних к молодым); 42 – гребни и бровки кальдерных уступов (от ранних к молодым); 43 – разрывные нарушения (а – с установленным смещением, б – безамплитудные, в – затухающие и погребенные); 44 – геологические границы между возрастными комплексами и отдельными телами (внутриформационные); 45 – зоны измененных пород; 46 – термальные источники и парогазовые струи.

Вулкан Горелый характеризуется высокой эксплозивной активностью. Так в интервале 8 – 6 тысяч лет назад, она выражалась большим количеством взрывных извержений, часто следовавших друг за другом. Следующие 5.5 тысяч лет, интенсивность извержений вулкана постепенно снижалась, а время покоя между ними могло достигать сотен лет. С рубежа 600-650 лет назад происходит начало нового периода в деятельности вулкана, выражающегося выбросами грубооломочного резургентного материала. В современной истории наблюдения и

изучения вулкана, отмечается, что с XVIII века возможно начинается новый цикл извержений с периодичностью извержений, примерно, один раз в 50 лет. Довольно крупные извержения наблюдались в 1929-1931, 1959-1960, 1980-1981 и 1984-1986 гг., которые сопровождались пепловыбросами и взрывами средней мощности [Новограбленов, 1930; Кирсанов, 1981; Будников, 1988]. После последнего извержения в 1986 году в кратере вулкана Горелый образовалась крупная фумарола, через которую производится активный выброс газов. Максимум газовой эмиссии наблюдался с 2010 по 2014 годы, когда, общая масса выбрасываемых газов составляла в среднем 11000 тонн в сутки [Aiyurra et al., 2012]. В этот же период под вулканом наблюдается повышенная сейсмическая активность, выражающаяся в наличии большого количества вулканотектонических событий и треморов [Овсянников, 2010]. Эти данные по сейсмичности вулкана Горелый получены с помощью одной станции GRL, установленной на вулкане 25 лет назад, а также двух других станций, установленных на соседних вулканах Мутновский и Асача. Станции, обслуживаемые КФГС РАН, в непрерывном режиме передают сейсмический сигнал в город по телеметрической связи [Соболевская, 2009; Берсенева и Соболевская, 2013]. Следует отметить, что ни точного положения гипоцентров землетрясений, ни какой-либо информации о внутреннем строении коры под вулканом определить с помощью этих станций было невозможно.

Помимо сейсмологических подходов, для изучения строения вулканической системы вулкана Горелый используются другие геолого-геофизические методы, в частности основанные на использовании электромагнитных полей. Так с помощью магнитотеллурического зондирования была получена геоэлектрическая модель [Мороз и Скрипников, 1995], которая позволила выделить проводящий слой с сопротивлениями в первые десятки Ом*м., что, вероятно, говорит о наличии жидкой фазы в нем (гидротермальные растворы и расплавы). Похожие результаты имеются в монографии [Бортникова др., 2013], в которой был

[Гавриленко и Озеров, 2009] проанализирована эволюция развития магмы от древней до современной постройки, а работа [Озеров и Кононкова, 2012] посвящена химическому составу, летучим компонентам и элементам примеси расплавов современного вулкана Горелый. После извержения в 1984-86 годах в одном из кратеров вулкана (всего около 11) образовалось кислое озеро [Aizurra et al., 2012], которое по классификации озер Камчатки [Первухин, 1937] относится к 1 типу и 2 подтипу – эндогенное бессточное кратерное озеро. Работа [Гавриленко и др., 2008] посвящена истории его образования, эволюции, характеристикам и химическому составу.

Рядом с вулканом Горелый находится вулкан Мутновский, образуя взаимосвязанную вулканическую структуру. Существует ряд работ, посвящённых изучению этих двух вулканов, как совместной структуры. Подробная деятельность вулканов в Голоцене была рассмотрена в работах Мелекесцев и др. [1987] и Селянгин и Пономарева [1999]. Еще одно исследование, в рамках которого учеными были построены модели динамики роста магматических очагов Мутновско-Гореловской группы вулканов, позволило выполнить расчеты температурных полей вокруг них и оценить запасы накопленного тепла во вмещающих очаги породах [Федотов и др., 2005]. Взаимосвязь геохимических процессов, протекающих в зоне субдукции и вулканах, была рассмотрена в работе [Duggen et al., 2007], что в конечном итоге позволило представить геодинамическую модель, объясняющую механизмы питания вулканов. Данная модель показала, что система питания вулкана Горелый оказывает значительное влияние на вулкан Мутновский, а не наоборот.

Стоит отметить, что в регионе Мутновской группы вулканов находится крупнейшая геотермальная электростанция в России. Строительство станции началось еще в СССР в 1988, а в эксплуатацию она была введена лишь в 2003 году. Установленная мощность электростанции 50 МВт [Колосов, 1997]. Потенциальная мощность геотермальной станции на базе Мутновского

месторождения по расчетам Института вулканологии АН СССР в 1974 году оценивалась в 300-400МВт [Колосов, 1997].

Подводя итог, стоит отметить, что метод сейсмической томографии давно и успешно применяется для изучения внутреннего строения структур с использованием различных параметров зарегистрированных сейсмических волн. В зависимости от изучаемого объекта и поставленных задач, может использоваться та или иная её разновидность. На сегодняшний день, для изучения вулканов, применяются такие типы: томография с активными источниками, пассивная сейсмическая томография, эмиссионная томография, томография с использованием сейсмического шума. При исследовании структур и процессов активных вулканов довольно часто используют метод пассивной сейсмической томографии, что подтверждается наличием большого количества работ по их изучению. Это обусловлено тем, что внутри таких объектов присутствуют естественные источники возбуждения – землетрясения.

Полуостров Камчатка – это уникальное место, которое относится к Курило-Камчатской зоне субдукции и включает в себя наиболее крупные, активные и мощные вулканы Курило-Камчатской дуги. Один из таких объектов, характеризующийся высокой эксплозивной активностью – вулкан Горелый. На момент исследования его активность выражалась повышенной сейсмичностью (по данным ГС ДВО РАН) и высокой газовой эмиссией.

Вулкан Горелый находится в доступной относительно других вулканов области, что упрощает его исследование. Его активность, выражающаяся в большом количестве слабых землетрясений и выбросах газа в атмосферу, не так опасна, по сравнению со многими другими вулканами. Метод пассивной сейсмической томографии никогда ранее не применялся для вулкана Горелый, и настоящая работа впервые представляет трехмерную сейсмическую модель верхней коры под ним.

Глава 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Сейсмологическое оборудование и установка временной сети станций

В 2013 году лабораторией сейсмической томографии ИНГГ СО РАН была установлена временная сеть станций на один из активных вулканов Камчатки – вулкан Горелый. Всего была установлена 21 станция на объекте изучения. Каждая станция представляет из себя комплект оборудования, состоящий из трехкомпонентного регистратора – Baykal ACN-87/88, молекулярно-электронного сейсмоприемника – СМЕ-4111-LT и десяти марганцево-воздушно-цинковых щелочных батарей Бакен ВЦ-1. Наиболее важные параметры станций приведены в таблице (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Параметры сейсмологического оборудования.

Baykal ACN-87/88	СМЕ-4111-LT	Бакен ВЦ-1
3 канала	3 канала: 2 горизонтальных и 1 вертикальный	Габаритные размеры (Д x Ш x В): 128x114x182 мм
Частота дискретизации: 50, 100, 200, 400, 1000 и 2000 Гц	Полоса частот: 0,0167 – 50 Гц	Вес: 3.5 кг
Напряжение питания: 9-15 В	Напряжение питания: 10-15 В	Напряжение: 2.6 В
Потребляемая мощность: < 0.6 Вт	Потребление: 20 мА	Ёмкость: 350 А/ч
Рабочая температура: От -20 до +70 °С	Рабочая температура: от -12 до +55 °С	Рабочая температура: от -15 до +40 °С
Вес: ~2 кг	Вес: 5.1 кг	
Разрядность данных: 24 Бит	Коэффициент преобразования: 4000 В/(м/с)	
Входное сопротивление: 20 КОм	Тип выходного сигнала: аналоговый, дифференциальный	

Baykal ACN-87/88	СМЕ-4111-LT	Бакен ВЦ-1
	Максимальный выходной сигнал: ± 20 В (или ± 5 мм/с)	

Использование элементов питания, таких как Бакен ВЦ-1, обладающих большой емкостью, позволило установить сеть в автономном режиме сроком на год. Для этого на станцию устанавливали систему из 10 батарей – два параллельно соединённых блока из пяти последовательно соединённых батарей, благодаря чему удалось добиться напряжения в системе питания 13-14 В и емкости в 700 А/ч. Доступ воздуха, необходимый для протекания химической реакции в батарее, был обеспечен за счет установки к блоку батарей воздушной трубки, сообщающейся с атмосферой.

Установка станций происходила в несколько этапов. Каждый комплект оборудования и аккумуляторы помещали в две ямы глубиной 0.5 - 1 м. Сейсмический датчик устанавливали на предварительно выровненный по горизонтали постамент, ориентировали по сторонам света и соединяли с сейсморегистратором и батареями. Во избежание контакта с водой, оборудование упаковывали в плотные полиэтиленовые мешки высокого давления, далее закапывали и маскировали так, чтобы снаружи оставались только GPS антенна и воздушная трубка. Установка станций производилась на высотах, значительно превышающих уровень моря, где территория покрывается толстым слоем снега, что препятствовало промерзанию и способствовало стабилизации рабочей температуры станций.

Станции были установлены вокруг вулкана Горелый по его постройке и в кальдере с расстояниями 2-3 километра между станциями (Рисунок 2.1), образуя плотную и равномерную сеть для изучения внутренней структуры вулкана. Снятие оборудования было произведено в августе 2014 года; полное время отработали 5 станций, распределение времени работы всех станций показано на рисунке (Рисунок 2.2).

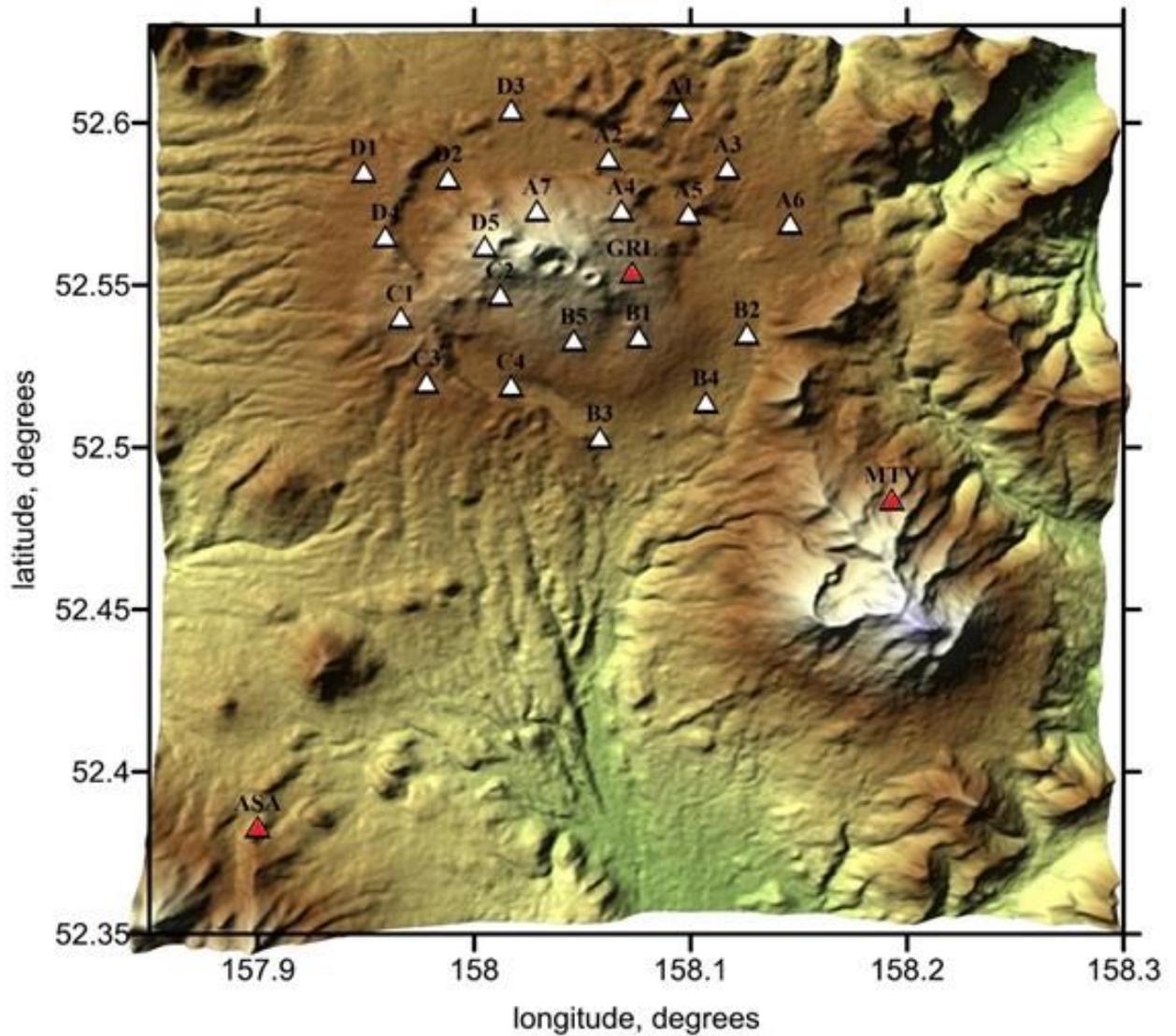


Рисунок 2.1 – Карта установки временной сети на вулкане Горелый и в области вокруг него. Всего была установлена 21 станция – белый треугольник. Красный треугольник – стационарные станции КФ ГС РАН, установленные на вулканах Горелый (GRL), Мутновский (MTV) и Асача (ASA).

График работы станций

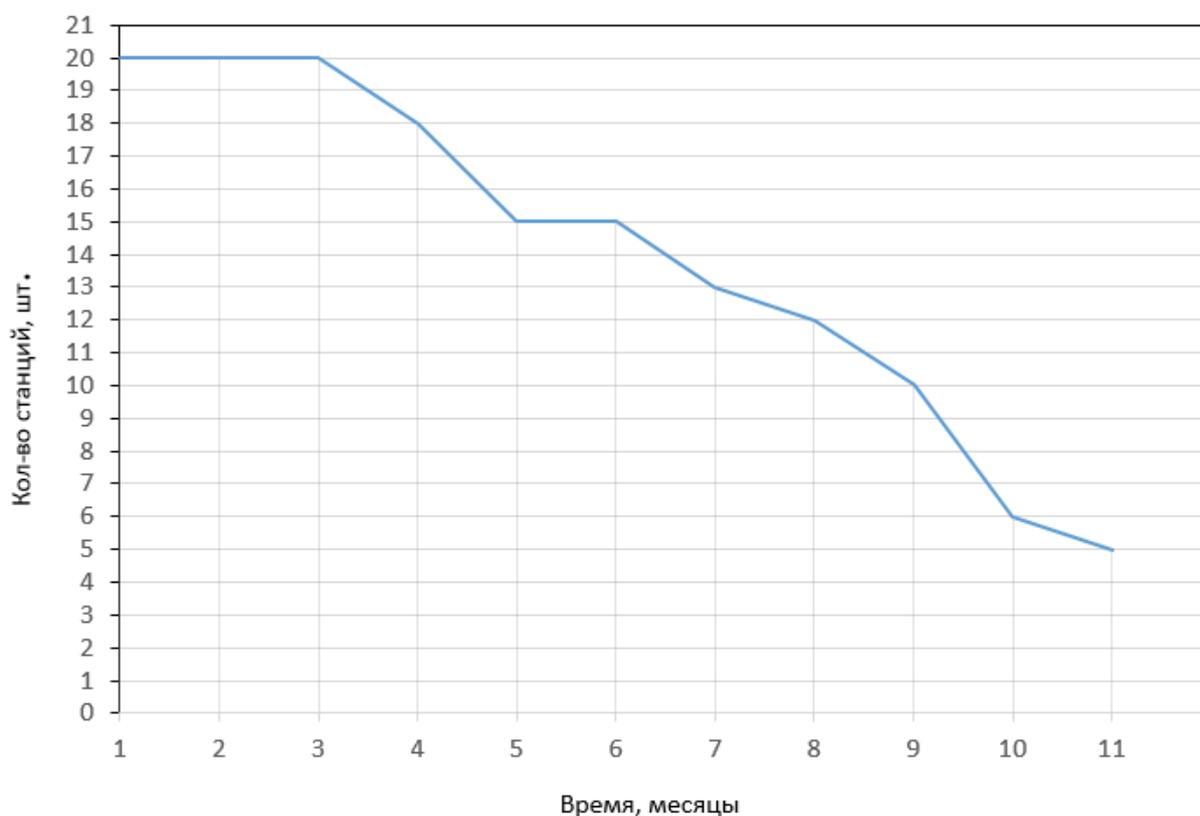


Рисунок 2.2 – График работы сейсмологических станций на вулкане Горелый, установленных в 2013 году. Полное время, 11 месяцев, отработали 5 станций из 21 установленной. Одна станция не запустилась.

2.2 Программа DIMAS для обработки волновых форм

Полученные со станций данные представляют собой трехкомпонентные волновые формы: две горизонтальные компоненты X и Y, ориентированные на север-юг и запад-восток, соответственно, и вертикальная компонента Z. Обработка данных была произведена в программе DIMAS, предоставленной Камчатским филиалом Геофизической службы РАН [Дрознин и Дрознина, 2010]. В программе реализовано множество алгоритмов, облегчающих процесс обработки, таких как фильтрация, снятие времен вступлений, работа с частотной областью, нормировка, локация землетрясения, алгоритм расчета модельных времен вступлений и т.д. Также она поддерживает различные форматы данных, в том числе и требуемый в данной работе формат - `baikal`.

Оборудование производило запись с частотой дискретизации 50-100 Гц, что является достаточным для снятия первых времен вступлений Р и S-волн. В связи со спецификой программы DIMAS, полученные записи были разделены на трехчасовые отрезки. После загрузки волновых форм за определенный промежуток времени со всех работающих на тот момент станций, производилось их масштабирование по амплитуде для облегчения восприятия информации и выделения событий на станциях. Данная опция выравнивает все каналы на всех станциях по максимальной амплитуде в окне. Далее применялся полосовой фильтр 2-8 Гц. Поиск оптимального фильтра заключался в ручном переборе различных параметров данного фильтра, при котором будет возможно наиболее качественно выделить первые вступления. Отправной точкой являлся стандартный полосовой фильтр, который используется КФ ГС РАН для обработки землетрясений на вулканах, который заложен в программу DIMAS – 1-6 Гц.

После завершения процедур подготовки волновых форм следовал процесс поиска событий. Основными критериями для их нахождения являлись высокоамплитудные относительно шума вступления Р и S-волн; вступления выделялись на всех трех каналах для максимально возможного количества станций. Следующим шагом было непосредственно снятие первых вступлений прямых Р и S-волн (Рисунок 2.3).

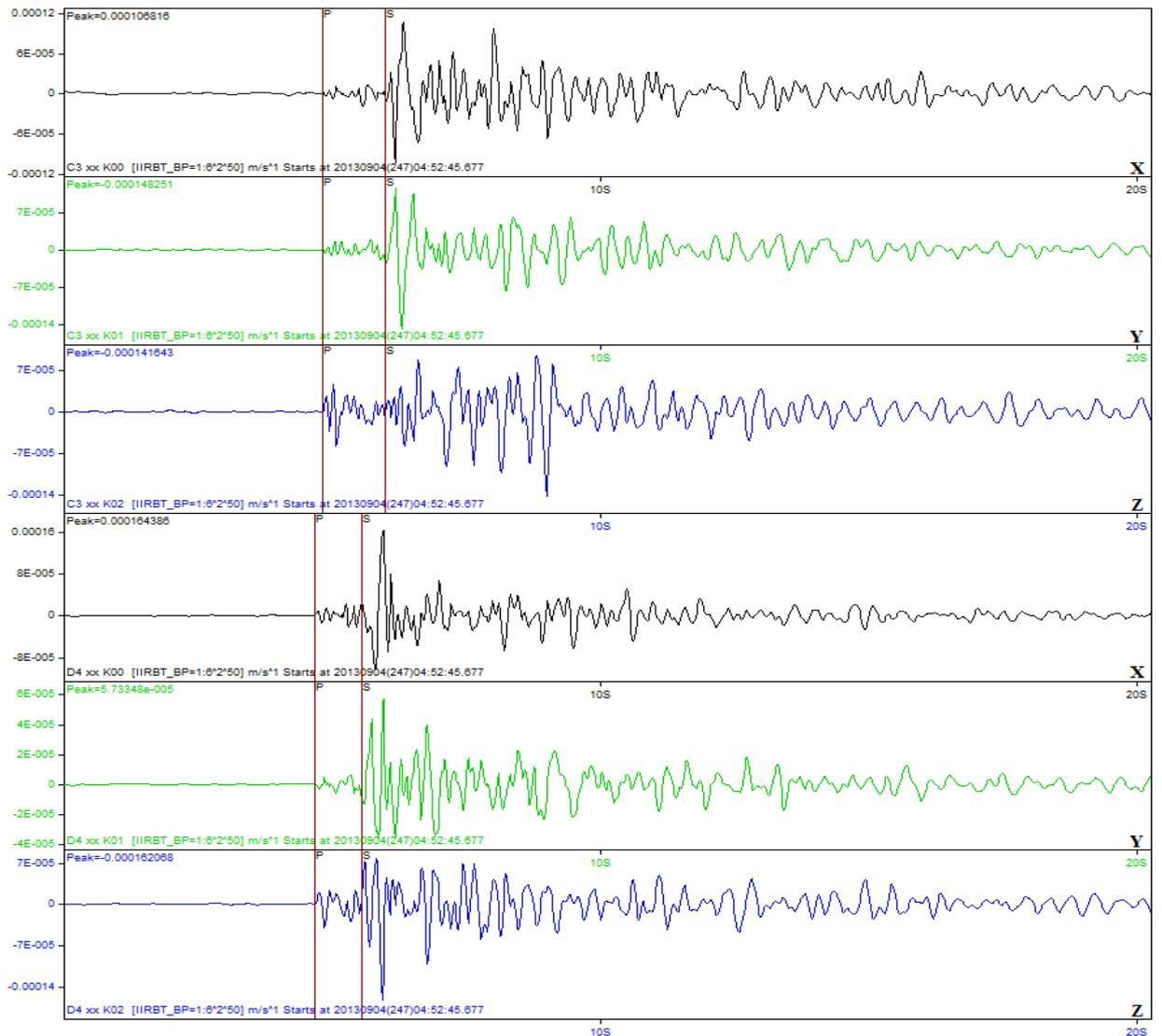


Рисунок 2.3 – Пример снятия времен вступлений прямых P и S-волн в программе DIMAS. Запись от 04.09.2013 длительностью 20 секунд. Фильтр – полосовой 2-8 Гц. Станции C3 и D4. Вертикальная компонента (Z) – синяя.

На этом этапе работы был обнаружен ряд сложностей. Во-первых, в период установки временной сети станций вулкан Горелый перешел в фазу высокой активности, что выражалось большим количеством различных событий в течение дня. По информации, предоставленной КФ ГС РАН, в день происходило порядка 200-300 толчков, вызванных различными природными явлениями. Загруженность записи событиями хорошо видна на Рисунке 2.4, где каждый скачок амплитуды является потенциальным сейсмическим событием.

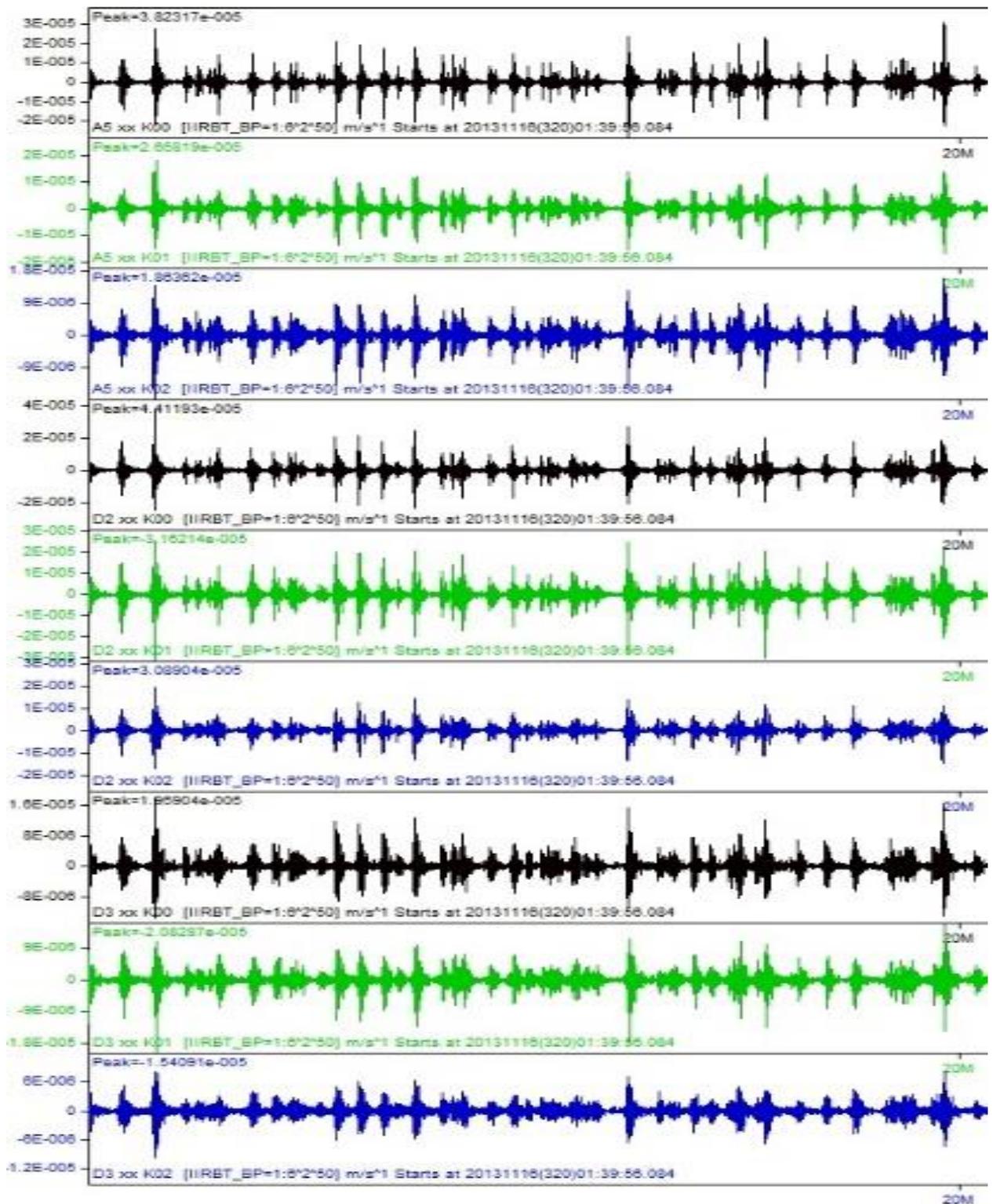


Рисунок 2.4 – Пример 20 минутной записи с вулкана Горелый. Запись от 16.11.2013 со станций A5, D2 и D3 (по 3 компоненты). Все скачки амплитуды – потенциальные землетрясения, которые анализировались вручную.

Во-вторых, сейсмические события на вулканах могут быть различной природы и, в связи с этим, имеют абсолютно разную волновую форму. Подробно о классификации вулканических землетрясений на полуострове Камчатка

рассказано в работах [Токарев, 1981; Гарбузова и Соболевская, 2010], которые существенно помогли при анализе и обработке волновых форм со станций, установленных на вулкане Горелый.

Тип I – по записи ничем не отличаются от тектонических землетрясений (Рисунок 2.5). Имеют ярко выраженные вступления объемных волн. Поверхностные волны либо очень слабы, либо вовсе отсутствуют.

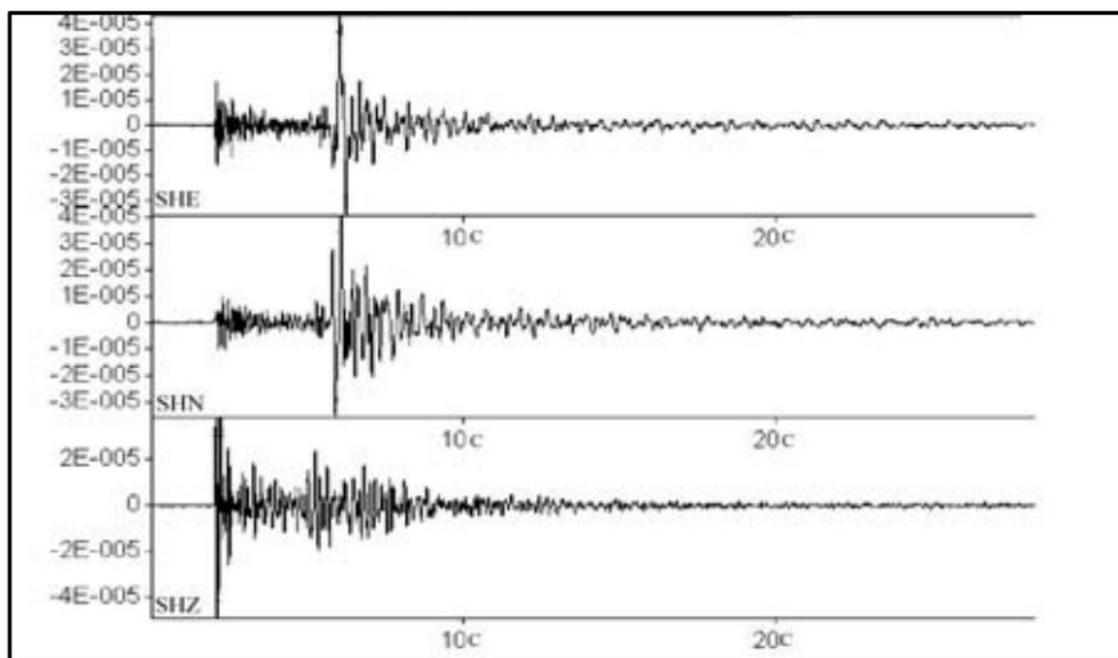


Рисунок 2.5 – Образец записи землетрясения типа I [Гарбузова и Соболевская, 2010]. Вулкан Ключевской, станция KLY. Глубина события ~ 16.9 км. Длина записи 30 сек.

Тип II – III – эти типы землетрясений объединяют в одну группу, из-за невозможности разделения их при массовой обработке. Объемные волны в таких событиях выделяются четко, но присутствующие поверхностные волны преобладают, имея амплитуду в 2-5 раз больше (Рисунок 2.6). Такой тип событий обычно сопровождает активизацию вулканов.

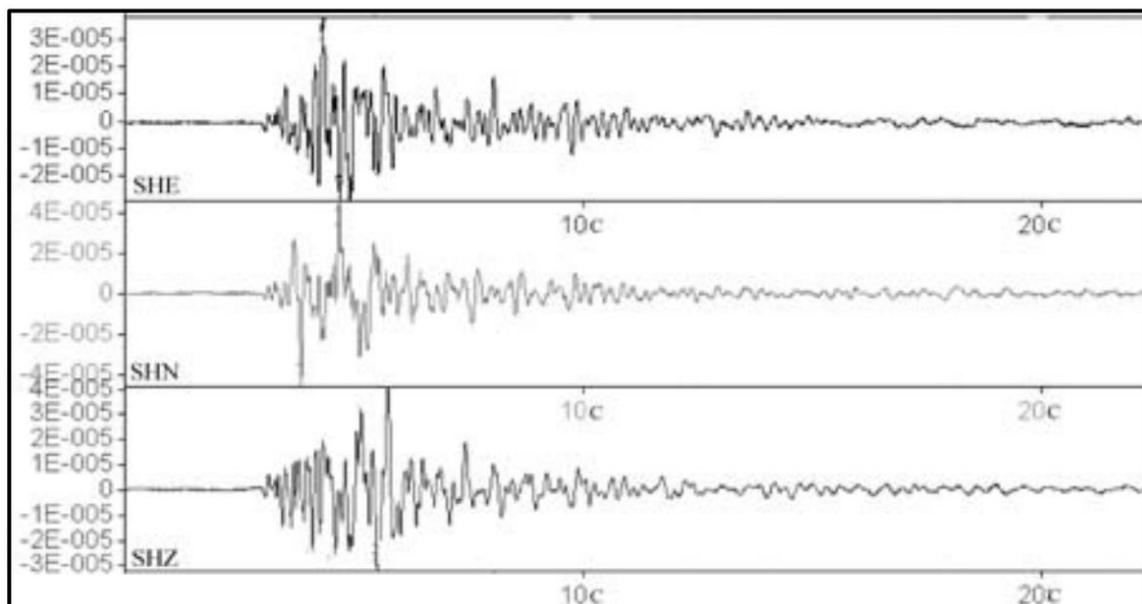


Рисунок 2.6 – Образец записи землетрясения типа II-III [Гарбузова и Соболевская, 2010]. Вулкан Горелый, станция GRL. Глубина события ~1.9 км. Длина записи 20 сек.

Тип IV – сильные поверхностные события, у которых невозможно обнаружить объемные волны (Рисунок 2.7). Обычно такой тип землетрясений предваряет и сопровождает извержение вулканов, но регистрируются и при спокойном их состоянии.

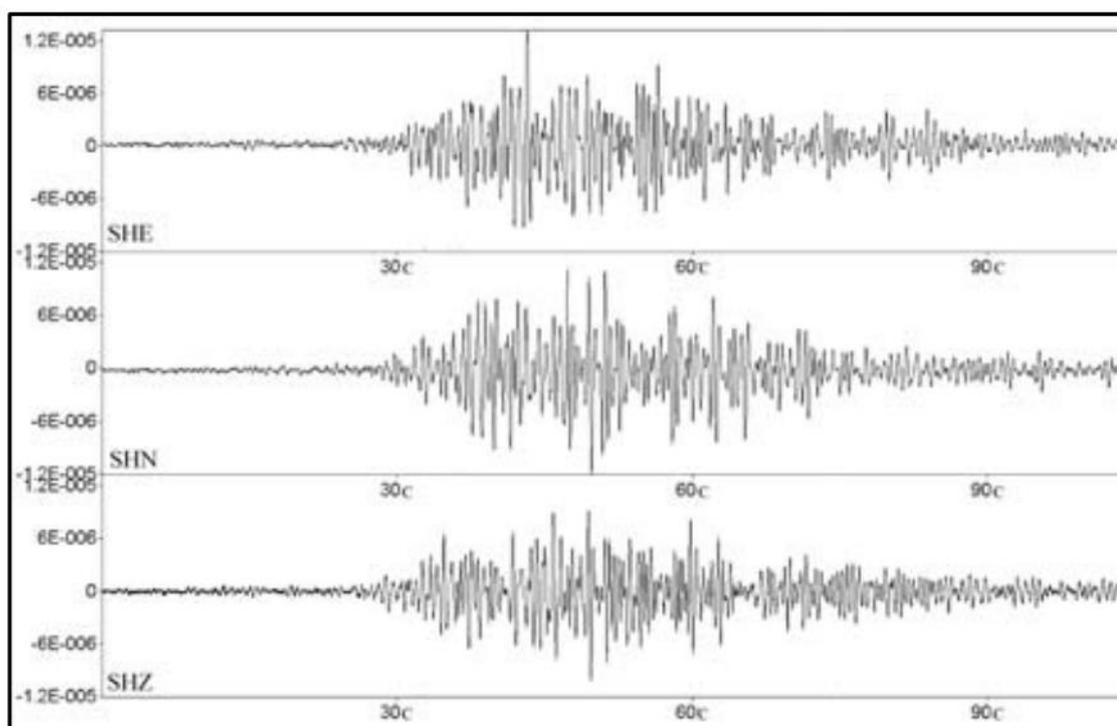


Рисунок 2.7 – Образец записи землетрясения типа IV [Гарбузова и Соболевская, 2010]. Вулкан Шивелуч. Длина записи 100 сек.

Тип V – вулканическое дрожание (тремор). Непрерывные колебания продолжительностью от нескольких часов до нескольких лет (Рисунок 2.8). Присуще всем активным вулканам, даже в состоянии покоя.

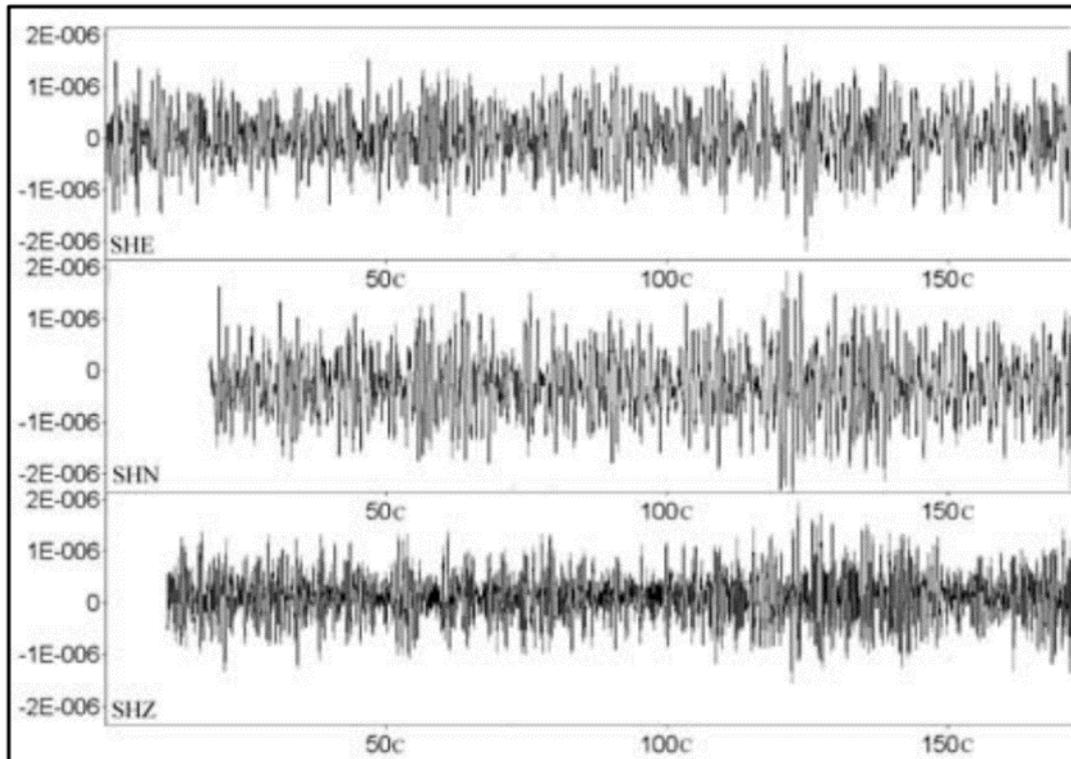


Рисунок 2.8 – Образец записи события типа V [Гарбузова и Соболевская, 2010]. Дрожание на вулкане Ключевской. Длина записи 170 сек.

Тип VI – недавно выявленный тип событий, который представляет из себя гибрид II-III, IV и V типов. Чаще всего выглядит как ряд поверхностных событий, идущих друг за другом (Рисунок 2.9). Продолжительность серии варьируется от нескольких минут до нескольких часов. Очень редко удается выделить объемные волны, но чаще всего это поверхностные волны с частотами 0,5-2 Гц.

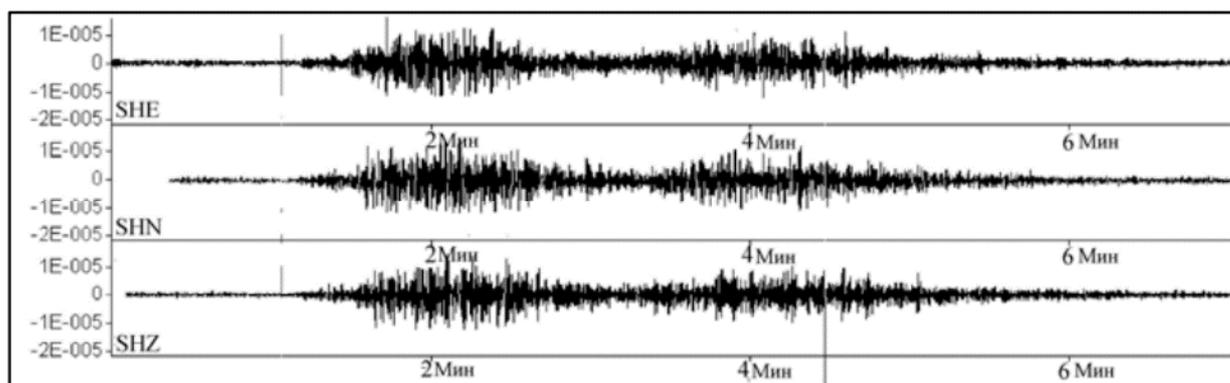


Рисунок 2.9 – Образец записи события типа VI [Гарбузова и Соболевская, 2010]. Серия, сопровождающая начало извержения вулкана Шивелуч 25.04.2009. Длина записи 7 мин.

В связи с сильной зашумленностью записей со станций, вызванной постоянным дребезжанием вулкана и выбросом газов из кратера, была установлена минимальная невязка 0,5 секунд, ошибка между отмеченным и истинным вступлением волны. В дальнейшем эта невязка минимизировалась в программе LOTOS. Также стоит отметить, что процесс обработки данных облегчал встроенный в программу DIMAS алгоритм «Predicted TravelTimes», который предсказывал времена вступлений P и S-волн, учитывая осреднённую скоростную модель, ожидаемую в районе вулкана.

2.3 Область использования и этапы алгоритма программы LOTOS

Сейсмическая томография – это метод определения непрерывного распределения 1D, 2D, 3D и 4D (в случае изменений во времени) сейсмических свойств среды по параметрам ее просвечивания сейсмическими волнами.

Алгоритм локальной сейсмической томографии LOTOS [Koulakov, 2009] предназначен для восстановления трехмерных распределений скоростей P- и S-волн, и координат источников по временам прихода сейсмических волн от локальных землетрясений. Стоит отметить, что данный алгоритм был разработан, как альтернатива популярному коду SIMULP [Thurber, 1983; Eberhart-Phillips, 1986], с целью устранения его некоторых важных недостатков. Алгоритм может быть применен к различным наборам данным, предоставляет широкий спектр тестирования результатов и системы наблюдения и достаточно прост в

использовании. Принцип работы программы - основные шаги алгоритма, представлены на Рисунке 2.10.



Рисунок 2.10 – Главная структура кода. Серые блоки показывают главные шаги кода; синий блок - входные данные: основные и параметры, которые вводит пользователь; красный блок – получаемые результаты; зелёная область – три объединённых этапа.

Программа работает поэтапно:

- 1) Предварительная локализация источников с использованием одномерной скоростной модели;
- 2) Локализация и коррекция параметров источников в 3D скоростной модели;
- 3) Построение параметризационной сетки. Реализуется только при первой итерации и далее не меняется.
- 4) Построение матрицы первых производных с использованием лучей и параметризационной сетки.
- 5) Матричная инверсия, в процессе которой одновременно определяются распределения аномалий скоростей, станционные поправки и параметры источников.

Стоит отметить, что этапы 3-5 осуществляются для нескольких параметризационных сеток различных ориентаций (подробнее в следующей главе).

б) Модели, полученные в конце 5 этапа, на базе нескольких параметризационных сеток с неравномерными узлами, усредняются и пересчитываются на равномерной сетке.

Полученная модель проходит через этапы 2, 4, 5 и 6 еще несколько раз, до получения конечной модели. На практике обычно используются 3-7 итераций, в зависимости от амплитуды искомых аномалий и качества данных [Кулаков, 2007]. Результатами является трехмерное распределение скоростей P и S -волн и координаты локальных источников. Более детально этапы рассмотрены в следующей главе.

2.4 Подробное рассмотрение этапов работы алгоритма локальной сейсмической томографии LOTOS

Этап 1. Локализация источников в одномерной модели:

На предварительном этапе производится локализация источников в стартовой скоростной модели. Этот этап должен обеспечивать устойчивое определение координат источников даже в случае, если не имеется никакой априорной информации. Для этого используется сеточный метод поиска, который гарантирует попадание источника в точку абсолютного экстремума целевой функции. Вместе с тем, сеточный метод подразумевает расчет большого количества времен пробега между точками сетки и станциями. При использовании точных методов расчета эта процедура может занять значительное время. По этой причине используют приближенные методы для расчета лучей. В программе LOTOS существует две альтернативные методики для вычисления времен пробега. В случае, если размеры области большие, и горизонтальные расстояния по лучам в большинстве значительно больше вертикальных используется метод табуляции, согласно которому на предварительном этапе

рассчитываются времена пробега для всех возможных расстояний и глубин источников. Далее при расчете времен при локализации производится линейная интерполяция табулированных значений. В случае малого размера области, когда глубина источников сопоставима с горизонтальным размером области, и, особенно, если имеются значительные превышения рельефа, для расчета времен пробега используют прямые линии, соединяющие источник и приемник. В случае эксперимента по вулкану Горелый использовался именно второй вариант расчета.

Определение положения источников основано на вычислении целевой функции, которая отображает вероятность положения источника в произвольной точке пространства. Целевая функция содержит информацию о невязках, об эпицентральных расстояниях и о фазах для каждого луча. Ее значение варьируется от 0 до 1, и в идеальном случае, когда все невязки меньше нижнего порога, будет равно 1.

В программе LOTOS, поиск экстремумов целевой функции выполняется, как было сказано ранее, используя метод сеточного поиска (Рисунок 2.11). Алгоритм действует итеративно, начиная с грубой сетки и заканчивая мелкой сеткой. Начальная сетка определяется в зависимости от системы наблюдения, а ее центром может выступать любая точка внутри объекта исследования. Она состоит из узлов $3 \times 3 \times 3$, среди которых производится перебор на поиск лучшего узла с максимальным значением целевой функции. Если точка находится с краю сетки, то строится следующая сетка с центром в этой точке, если лучшая точка найдена, то производится перебор уже на более тонкой сетке. Как показывает практика, чаще всего достаточно 3-4 градаций сетки, с шагом от 20 до 0,5 километров. Этот алгоритм вполне надежен. К примеру, программа может найти правильные координаты источников, даже если они расположены на расстоянии 400-500 километров от начальной точки поиска.

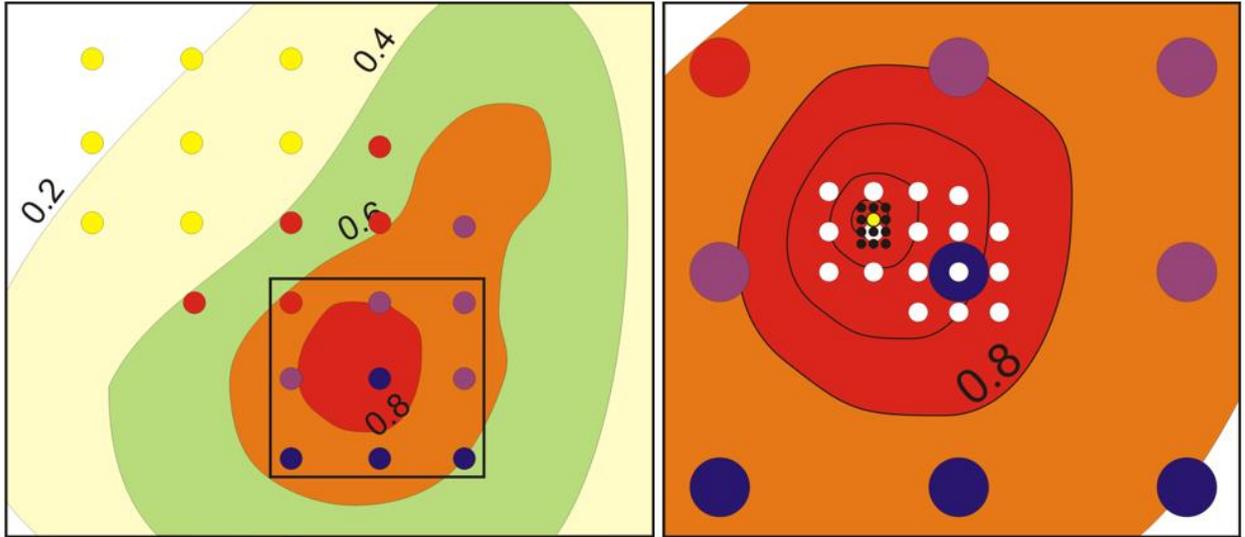


Рисунок 2.11 – Сначала делается поиск по грубой сетке (левая картинка). В каждой точке вычисляем целевую функцию. Перемещаемся от узлов, где целевая функция максимальна. После определения максимума целевой функции в грубой сетке, делаем то же самое для более мелкой сетки (правая картинка). Алгоритм включает 3-4 этапа градации сетки, от 20 до 0,5 километров.

Этап 2. Локализация источников в 3D модели.

Одной из возможностей кода LOTOS является алгоритм лучевого трассирования, основанный на принципе Ферма о минимизации времени пробега, который называется методом изгиба или bending algorithm [Um and Thurber, 1987]. В программе LOTOS используется собственная модификация этого алгоритма. Его важным свойством является то, что он может использовать любые способы параметризации при описании распределения скоростей. Согласно принципу Ферма, траектория луча проходит таким образом, чтобы время пробега вдоль него было минимальным. Поиск пути с минимальным временем пробега происходит в несколько шагов. Чтобы лучше представлять основные принципы данного метода, рассмотрим пример, показанный на (Рисунок 2.12). Задаем модель, где имеются резкие изменения аномалии скоростей. В вертикальном направлении абсолютная скорость меняется от 2.5 до 9 км/с. Аномалии имеют амплитуду в пределах $\pm 30\%$. В самом начале путь луча является прямой линией, концы которой фиксированы, а точка А используется для изгиба (Шаг 1). Точка А сдвигается в перпендикулярном направлении к траектории луча (в нашем случае

по плоскости луча). Значения сдвигов по лучу определяются линейно от точки А до его концов (точки 1 и 2), как показано на рисунке 1.3. Далее (Шаг 2) зафиксировав точки 1, 2 и 3 двигаем точки А и В. После таких деформаций в итоге получаем траекторию луча в этой модели (Шаг 8). Таким образом, построенный луч стремится проходить через высокоскоростные аномалии и наоборот обходить низкоскоростные.

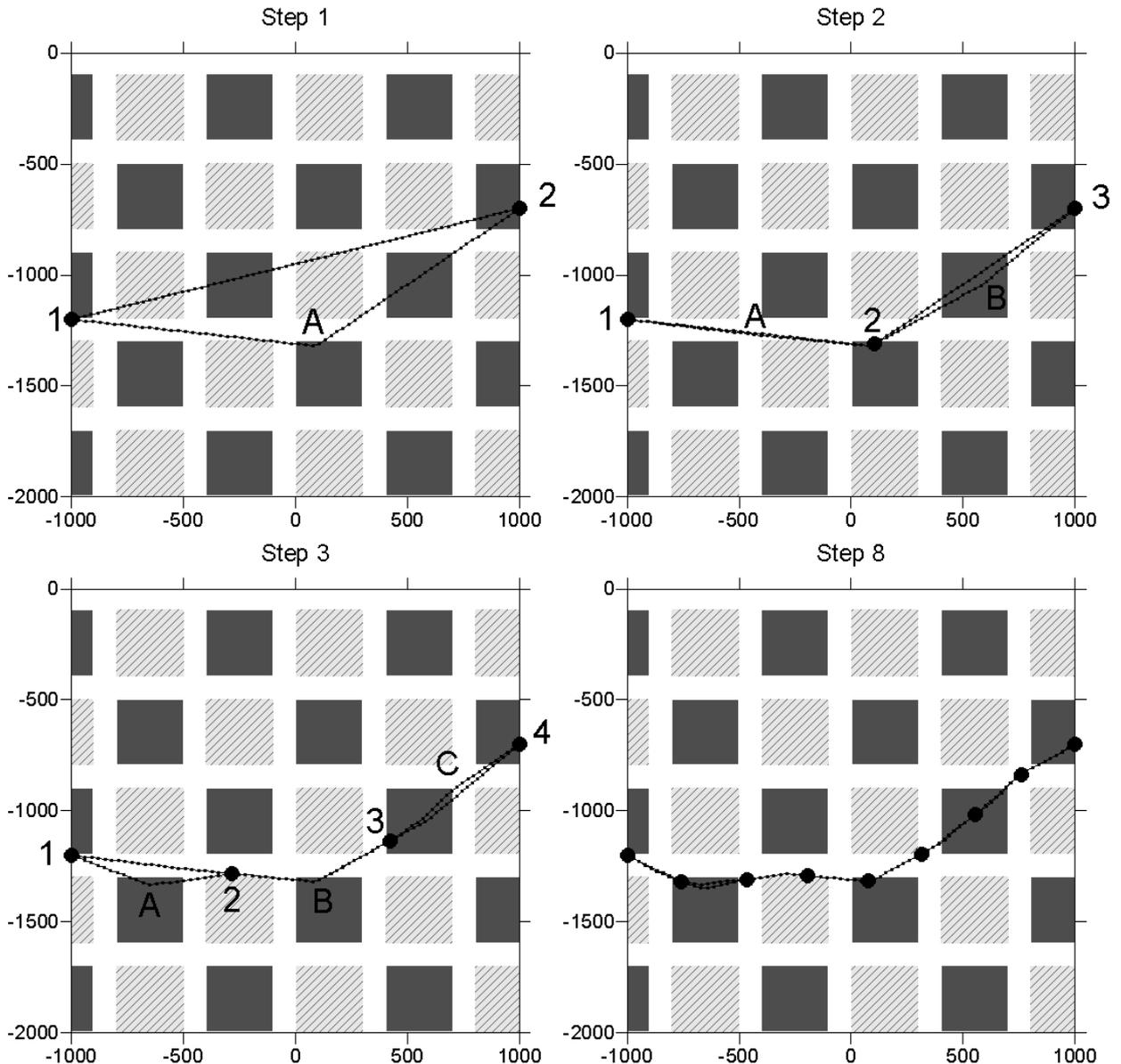


Рисунок 2.12 – Построение луча методом изгиба. Заштрихованные квадраты – скоростные аномалии с амплитудой -30%, темно-серые квадраты с амплитудой +30.

Для определения положения источника на данном этапе производится поиск экстремума целевой функции, которая имеет такое же описание, как и в случае предварительной локализации. Тем не менее, метод сеточного поиска, который

был эффективен для 1D модели в силу использования упрощенных методов расчета времен пробега, требует значительное расчётное время при 3D лучевом трассировании. По этой причине на данном этапе используется метод градиентного спуска (Рисунок 2.13) для локализации источников в 3D модели, который не так надежен, как метод сеточного поиска, но является более быстрым.

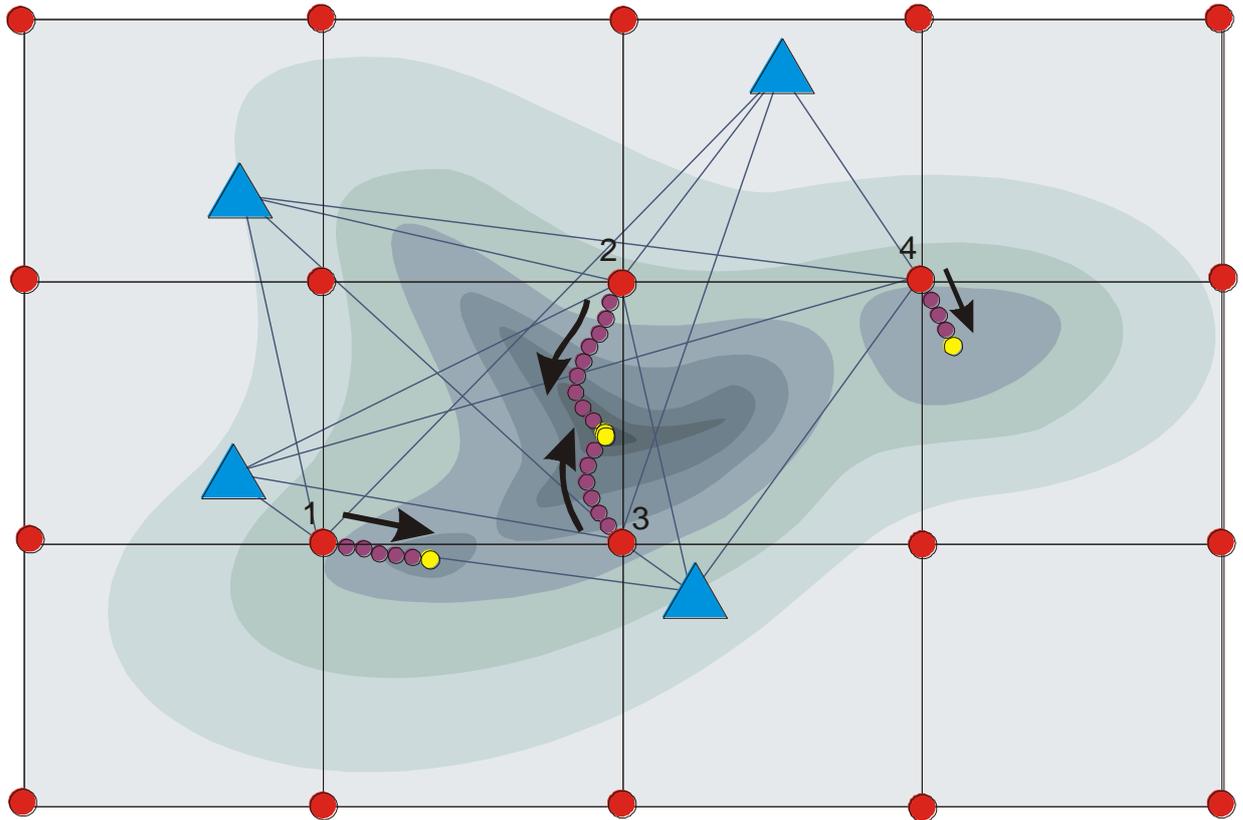


Рисунок 2.13 – Метод градиентного спуска используется, когда уже имеется грубое приближение по локализации источника, т.к. решение очень сильно зависит от стартовой точки.

Для локации источника производится решение системы линейных уравнений для 4-х неизвестных (Рисунок 2.14). Определяются dx , dy , dz , которые показывают направление градиентного спуска целевой функции и dt_0 – время в очаге.

$$\begin{aligned}
 P_{x,1} dx + P_{y,1} dy + P_{z,1} dz + dt_0 &= dt_1 \\
 P_{x,2} dx + P_{y,2} dy + P_{z,2} dz + dt_0 &= dt_2 \\
 &\dots \\
 P_{x,n} dx + P_{y,n} dy + P_{z,n} dz + dt_0 &= dt_n
 \end{aligned}$$

Рисунок 2.14 – Система линейных уравнений для 4-х неизвестных. P_x, P_y, P_z – направление луча (вектор медленности) в точке источника.

Полученные поправки корректируют гипоцентр источника и производится пересчет целевой функции. Если получившиеся значения хуже, то делается возврат к предыдущему значению и операция повторяется, пока длина шага не станет менее заданного значения.

Этап 3. Построение параметризационной сетки.

Для параметризации скоростных вариаций существуют 2 альтернативных метода, реализованных в программе LOTOS: первый – это параметризация с помощью узлов (Рисунок 2.15), второй – это параметризация с помощью блоков, но в работе он не использовался, поэтому рассмотрен будет только первый вариант.

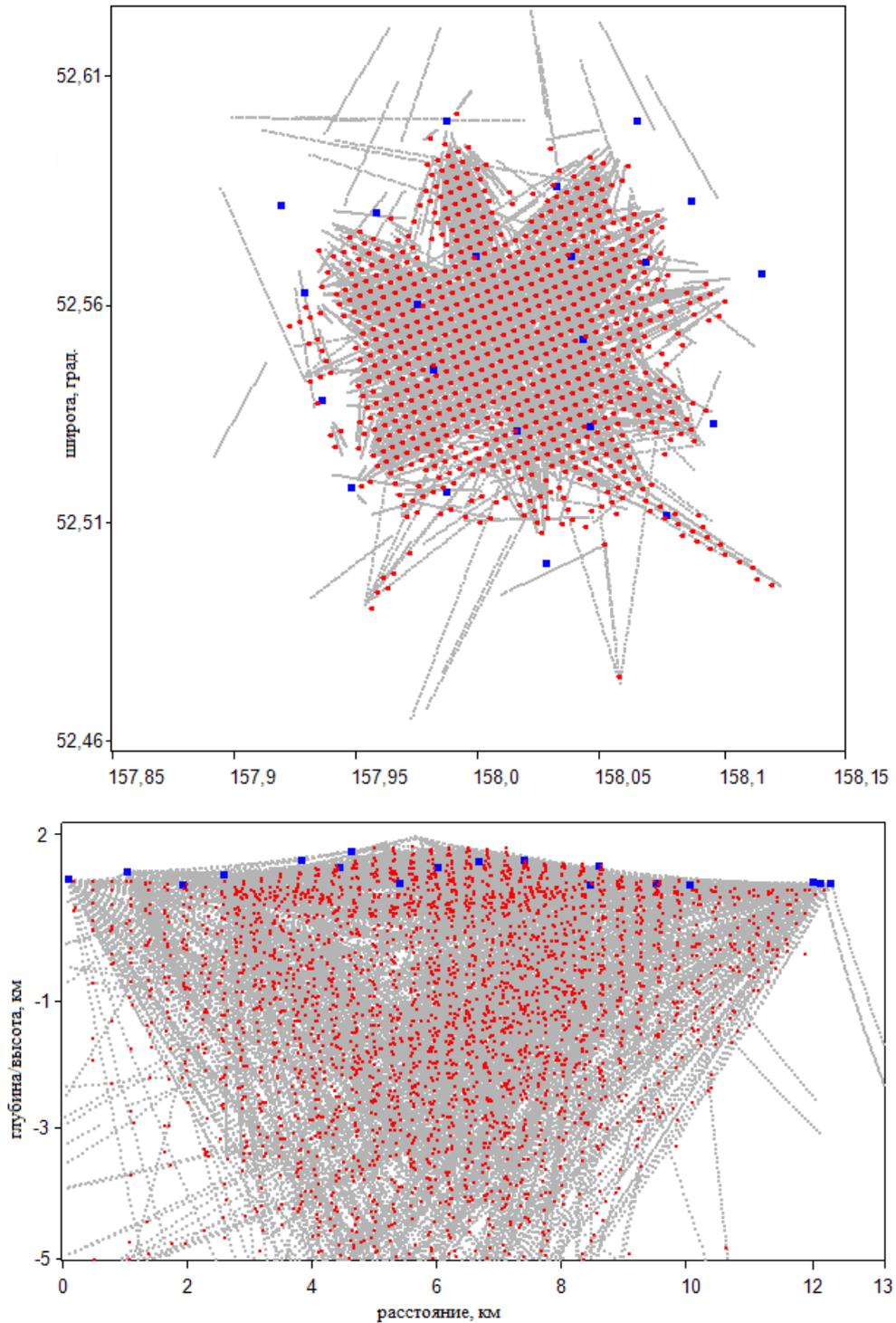


Рисунок 2.15 – Пример узловой параметризации. Объект исследования вулкан Горелый. Верхний рисунок – горизонтальное распределение узлов (красные точки) в области вулкана Горелый. Шаг между узлами - 0,3 км. Нижний рисунок – распределение узлов (красные точки) по вертикальному профилю под вулканом Горелый. Минимальный шаг между узлами – 0,3 км. Все полученные узлы в области под вулканом спроецированы на профиль. Синие квадраты – временные сейсмологические станции. Серые линии – лучи Р-волн.

Суть параметризации заключается в поиске скоростных аномалий в узлах трехмерной сетки, которые распределены в изучаемой области, а структура сетки зависит от плотности лучей. В горизонтальной плоскости, линии, на которых находятся узлы, расположены равномерно с изначально заданным шагом. По вертикали, узлы на линиях распределяются в зависимости от плотности лучей, но не более плотно, чем заданный минимальный шаг, который близок по значению к шагу по горизонтали. Таким образом, удается избежать избыточной плотности узлов по вертикали. Для определения скорости между узлами используется билинейная интерполяция. Чтобы минимизировать влияние геометрии сетки на результат, инверсия производится для нескольких сеток с различной базовой ориентацией в горизонтальной плоскости (например, с азимутами 0° , 22° , 45° и 67°). Осреднение результатов инверсии, полученных для разных сеток, дает нам конечную модель. Стоит отметить, что расстояние между узлами выбирается так, чтобы оно было существенно меньше ожидаемых размеров аномалий. Такой шаг позволяет нам минимизировать влияние конфигурации параметризационных сеток на результат.

Этап 4. Расчет матрицы первых производных.

Вычисление матрицы первых производных производится вдоль лучей, посчитанных с помощью метода изгиба на этапе 2 (bending algorithm). Каждый элемент матрицы $A_{ij} = \partial t_i / \partial V_j$ это изменение времени вдоль i -го луча вызванный единичным изменением скорости в j -ом узле. Вектор данных в полученной системе соответствует значениям невязок, рассчитанным после этапа локализации источников.

Этап 5. Матричная инверсия.

Инверсия выполняется одновременно для распределения аномалий P и S скоростей (Рисунок 2.16), используемых в вычислениях матрицы на этапе 4. В дополнение к этому добавляются параметры источников (dx , dy , dz и dt) и стационарные поправки (P или S). Вектор данных содержит временные невязки, вычисленные после локализации источников. Регуляризация выполняется путем

добавления в матрицу специального сглаживающего блока. Каждая строка такого блока содержит два равных элемента с разными знаками, которые соответствуют соседним узлам параметризационной сетки. При этом вектор данных, соответствующий данному блоку, является нулевым. Увеличение веса этого блока матрицы при инверсии приводит к сглаживанию решения. Для регулировки амплитуды имеется третий матричный блок с диагональной структурой, который содержит только один ненулевой элемент в каждой строке. Правая часть (вектор), также нулевая. Коэффициенты амплитудной регуляризации и сглаживания определяются путем выполнения синтетического моделирования. Инверсия матрицы выполняется посредством LSQR (Sparse Equations and Least Squares) [Paige and Saunders, 1982, Van der Sluis and Van der Vorst, 1987] - метода неполных уравнений и наименьших квадратов. Сумма полученных скоростных вариаций и стартовой модели используется на следующей итерации в качестве новой референтной модели.

Алгоритм позволяет задавать аномалии любой формы с различными амплитудами, как одиночные, так и повторяющиеся («шахматная доска»), произвольно нарисованные в горизонтальной и вертикальной плоскости.

Времена пробега лучей в синтетической модели вычисляются вдоль траекторий, построенных методом изгиба в трехмерном пространстве, при этом, конфигурация источников и приемников остается такой же, что и при инверсии реальных данных. Кроме того, к полученным синтетическим временам пробега добавляется случайный шум. Его значение подбирается так, чтобы среднее уменьшение нормы невязок при инверсии соответствовало аналогичной процедуре при обработке реальных данных. Все свободные параметры остаются такими же, что и в реальном случае [Кулаков, 2007].

Программа локальной сейсмической томографии LOTOS, содержит все необходимые инструменты для комплексного изучения различных объектов исследования. Она интуитивно понятна, проста в освоении и содержит программный пакет для тестирования результатов. Количество сделанных работ с использованием алгоритма LOTOS и ее признание в мире, говорят об ее актуальности и качестве получаемых результатов. В связи с этим было решено применить данный программный софт на таком сложном природном объекте, как активный вулкан, в нашем случае – вулкан Горелый.

Таким образом, для выполнения поставленных задач по изучению объекта и проведения полноценного качественного исследования имеются все необходимые данные и программное обеспечение. А именно:

- Непрерывные сейсмические записи с августа 2010 по август 2014 года с временной сети станций, установленной на изучаемом объекте.
- Программа DIMAS для работы с трехкомпонентными волновыми формами, в которой производилась фильтрация, снятие времен вступлений продольных и поперечных волн.

- Программа локальной сейсмической томографии LOTOS, которая предназначена для восстановления трехмерных распределений скоростей Р и S-волн, а также координат источников по временам прихода сейсмических волн от локальных землетрясений.
- Синтетические тесты в программе LOTOS, которые позволяют оценить достоверность получаемых значений амплитуды аномалий, найти оптимальные коэффициенты регуляризации и сглаживания, проверить разрешающую способность системы наблюдения.

Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

3.1 Результаты обработки сейсмоданных и локализации источников

В ходе обработки трехкомпонентных волновых форм в программе DIMAS было выделено 360 землетрясений за период с сентябрь 2013 по февраль 2014. К весне 2014 года активность вулкана начала спадать, а количество работающих станций уменьшилось, что сказалось на качестве локализации источников. По этой причине данные после февраля 2014 года не обрабатывались. Карта эпицентров найденных событий приведена на Рисунке 3.1.

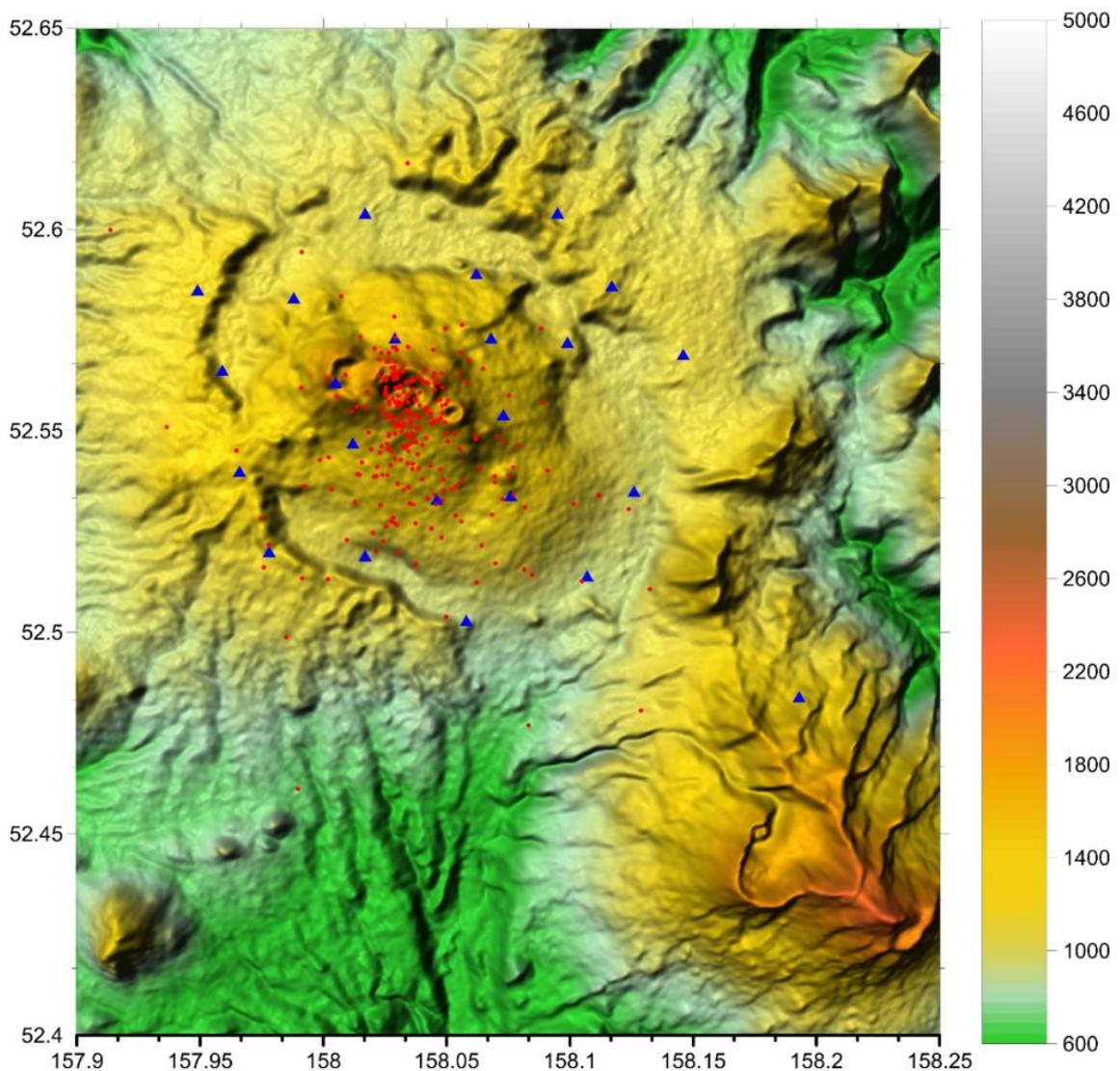


Рисунок 3.1 – Эпицентры найденных землетрясений на вулкане Горелый за период с сентября 2013 и февраль 2014. Синие треугольники – станции, красные точки – эпицентры землетрясений.

Видно, что источники землетрясений сконцентрированы под постройкой вулкана Горелый, только единичные события выходят за площадь кальдеры, в которой находится объект изучения. Согласно классификации, приведенной в работе [Гарбузова и Соболевская, 2010], под вулканом Горелый наблюдаются практически все типы землетрясений:

Тип II-III - основной тип событий, использованных в обработке (Рисунок 3.2). На них достаточно четко выделяются вступления объемных Р и S-волн. Как было сказано ранее, они обычно сопровождают активизацию вулканов, что мы и наблюдаем на изучаемом объекте.

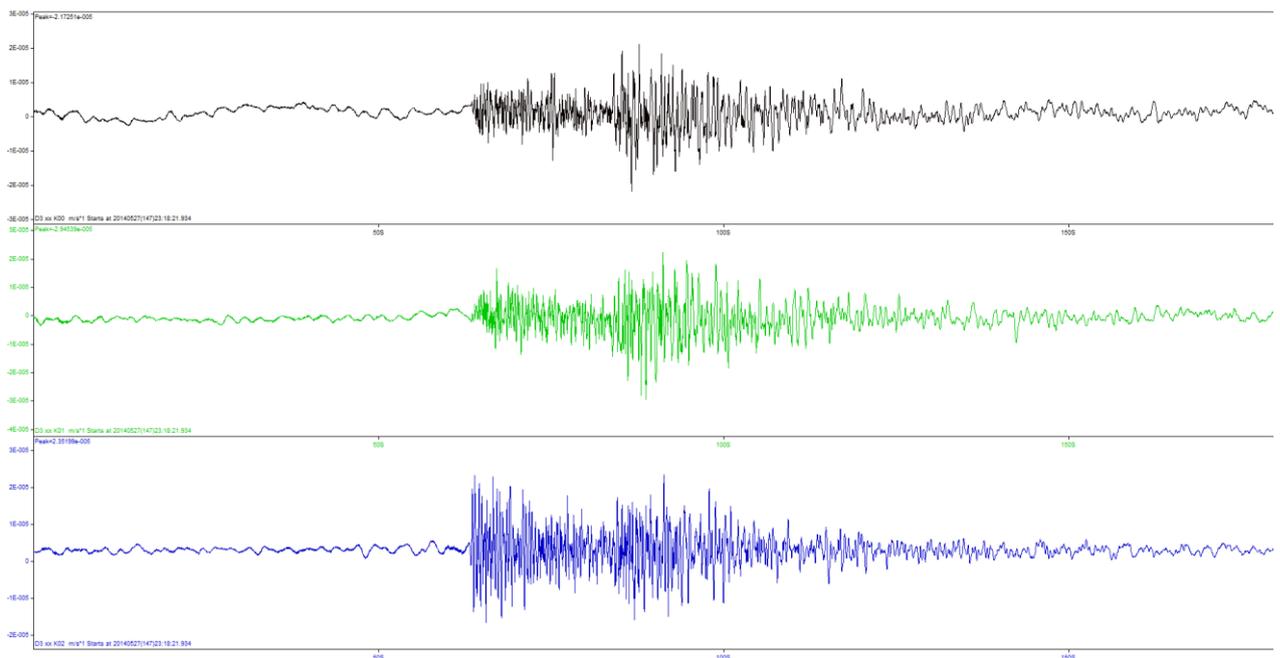


Рисунок 3.2 – Пример события типа II-III на вулкане Горелый. Станция D3. Длина записи 200 сек.

Тип I наблюдался в единичных случаях, что обусловлено преобладанием слабых землетрясений, имеющих небольшие амплитуды, и постоянным дребезжанием вулкана, из-за чего записи были зашумлены (Рисунок 3.3).

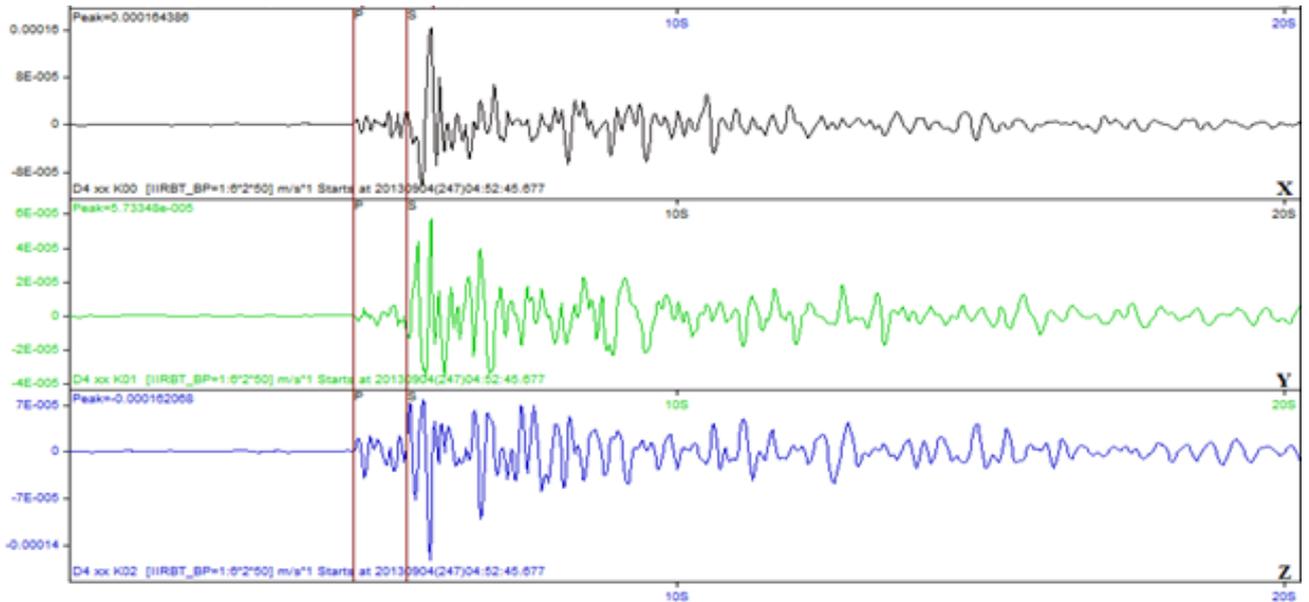


Рисунок 3.3 – Пример события типа I на вулкане Горелый. Станция D4. Длина записи 20 сек.

Тип IV - наиболее распространенный вид событий, у которых присутствуют только поверхностные волны, из-за чего выделение объемных волн невозможно (Рисунок 3.4). Согласно классификации, такой тип землетрясений предваряет и сопровождает извержение вулканов, но регистрируются и при спокойном их состоянии. Напомним, что на момент исследования у вулкана Горелый наблюдался высокий уровень дегазации, что выражалось выбросами 11000 тонн газа ежедневно.

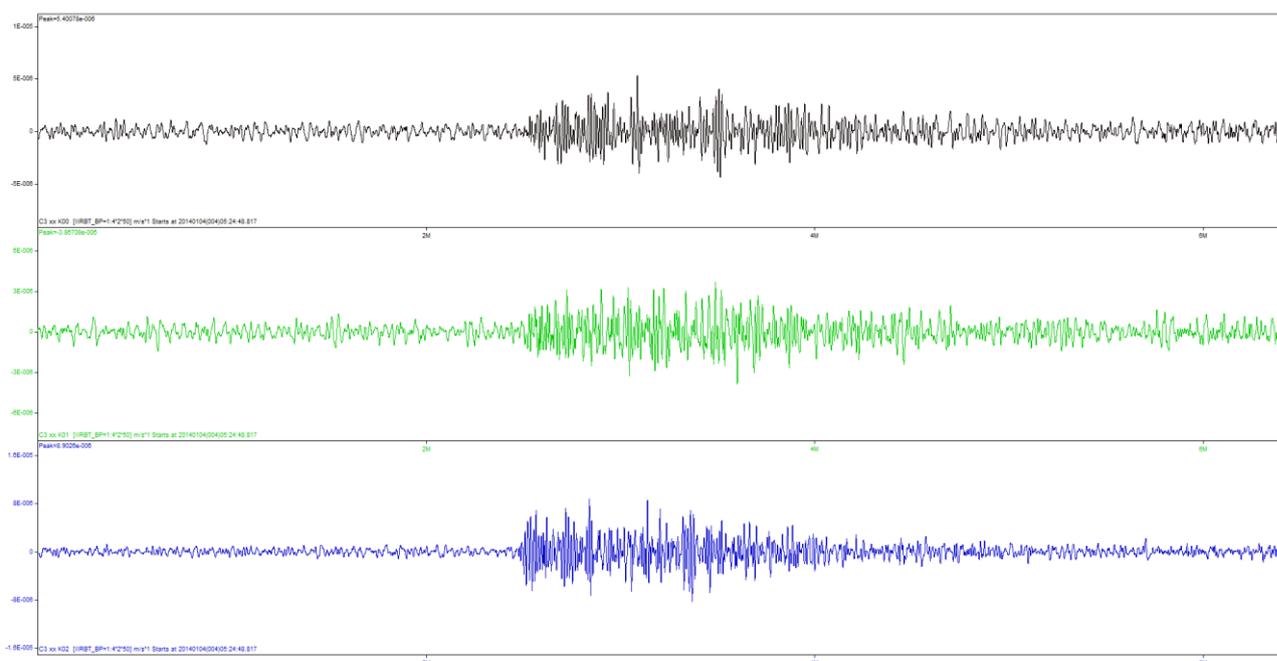


Рисунок 3.4 – Пример события типа IV на вулкане Горелый. Станция С3. Длина записи 6 мин.

Тип V – вулканическое дрожание (тремор) (Рисунок 3.5). Данный тип присущ всем активным вулканам даже в состоянии покоя, поэтому присутствует и на данном объекте на записанных волновых формах.

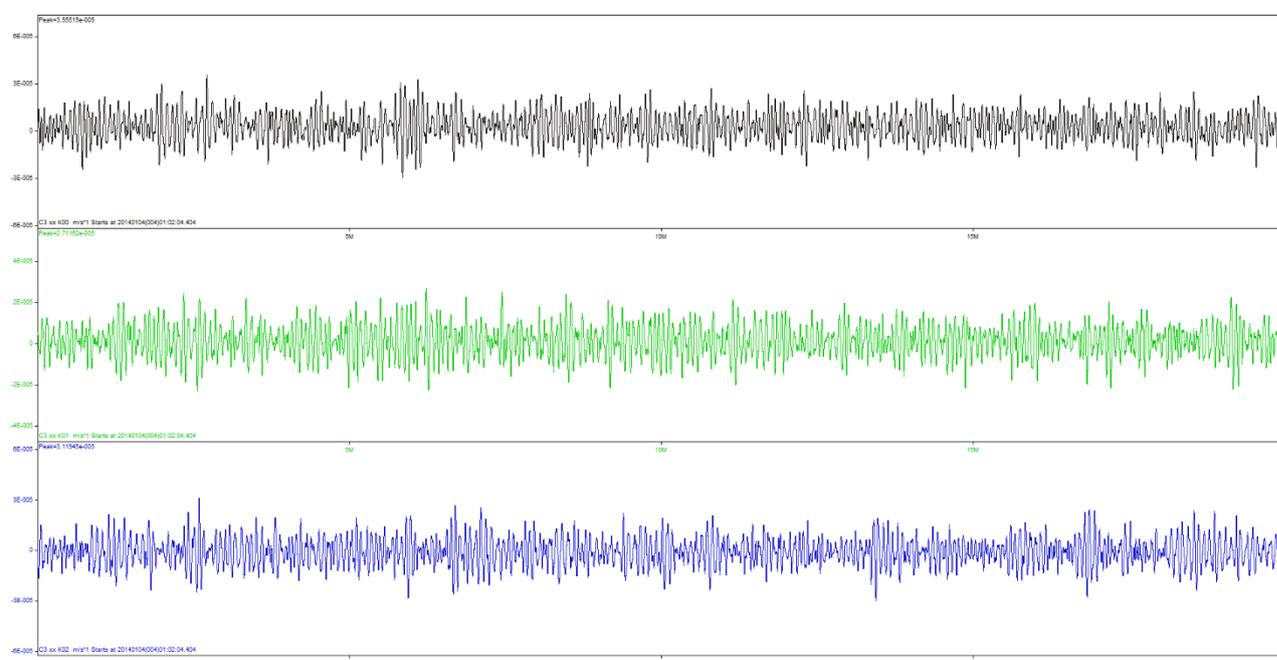


Рисунок 3.5 – Пример события типа V на вулкане Горелый. Станция С3. Длина записи 20 мин.

Тип VI представляет собой гибрид II-III, IV и V типов. В данном исследовании этот тип был сразу отбракован, как и тип IV.

Перед использованием результатов обработки в дальнейшем исследовании, выходные данные из программы DIMAS, имеющие формат данных «.pks», были конвертированы во входной формат программы LOTOS (подробное описание программы в Главе 3).

3.2 Локальная сейсмическая томография, построение скоростных моделей

Дальнейшая обработка и получение результатов были полностью произведены в программном пакете LOTOS. Предварительная локализация источников землетрясений была выполнена с помощью метода сеточного поиска, описанного в главе 2 параграф 4. Результаты этого этапа показаны на Рисунке 3.6.

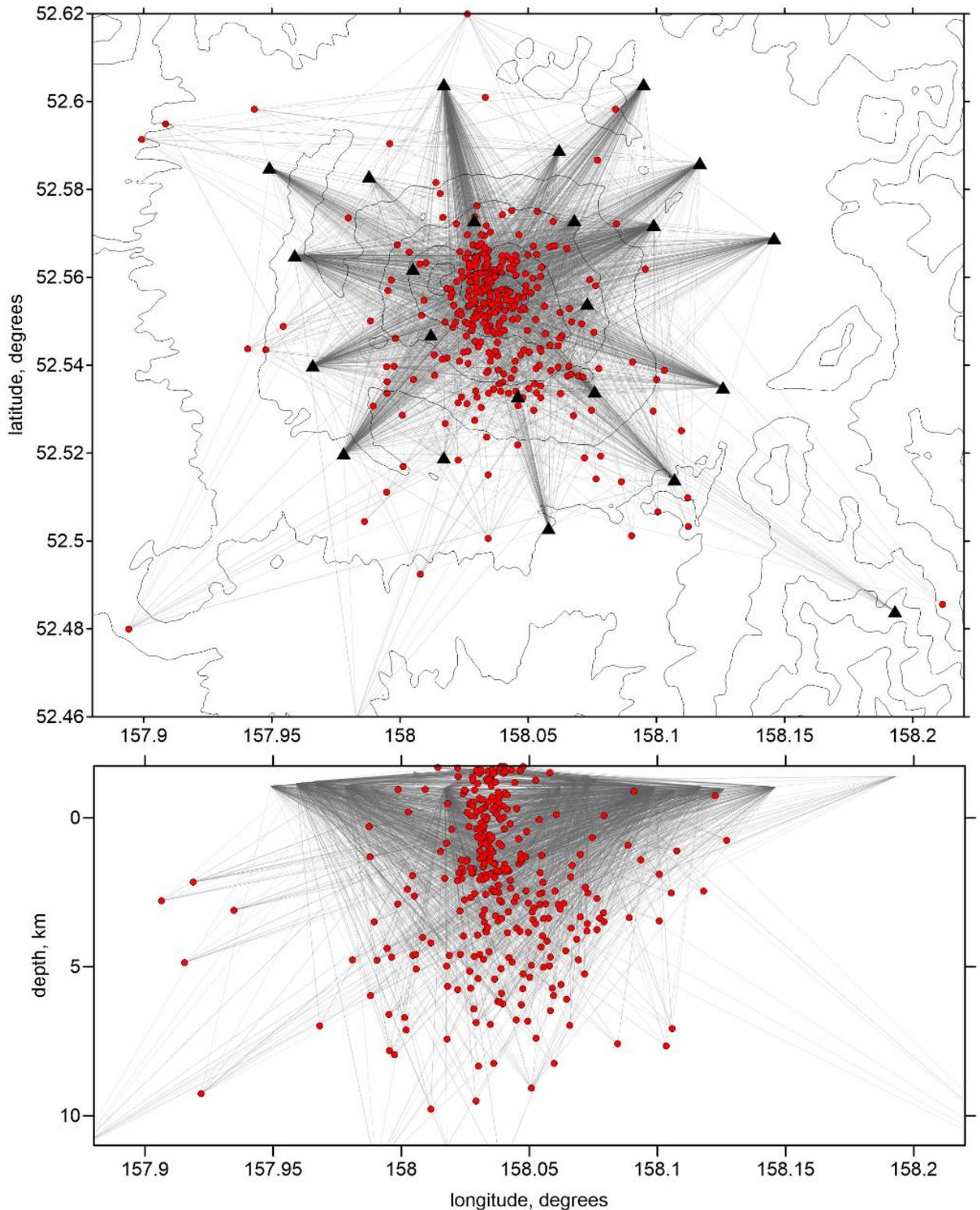


Рисунок 3.6 – Распределение землетрясений после первичной локализации. Красные точки – источники, черные треугольники – станции. Верхнее изображение - распределение по широте и долготе, нижнее по глубине и долготе.

Перед началом томографической инверсии был произведен поиск оптимальной стартовой скоростной 1D модели. Для этого в алгоритме локализации источника были использованы различные скоростные модели и

произведено сравнение значения средней минимальной невязки. Скорости Р-волн в верхнем слое варьировали от 1,7 до 3,9 км/с с шагом 0,2 км/с, значение отношения V_p/V_s - от 1,35 до 1,77 с шагом 0,02, также использовали разные градиенты изменения скорости с глубиной. Во всех случаях минимальные значения невязок между истинными и модельными временами вступлений волн были получены при чрезвычайно низком значении V_p/V_s , варьирующемся от 1,45 до 1,55 (Рисунок 3.7).

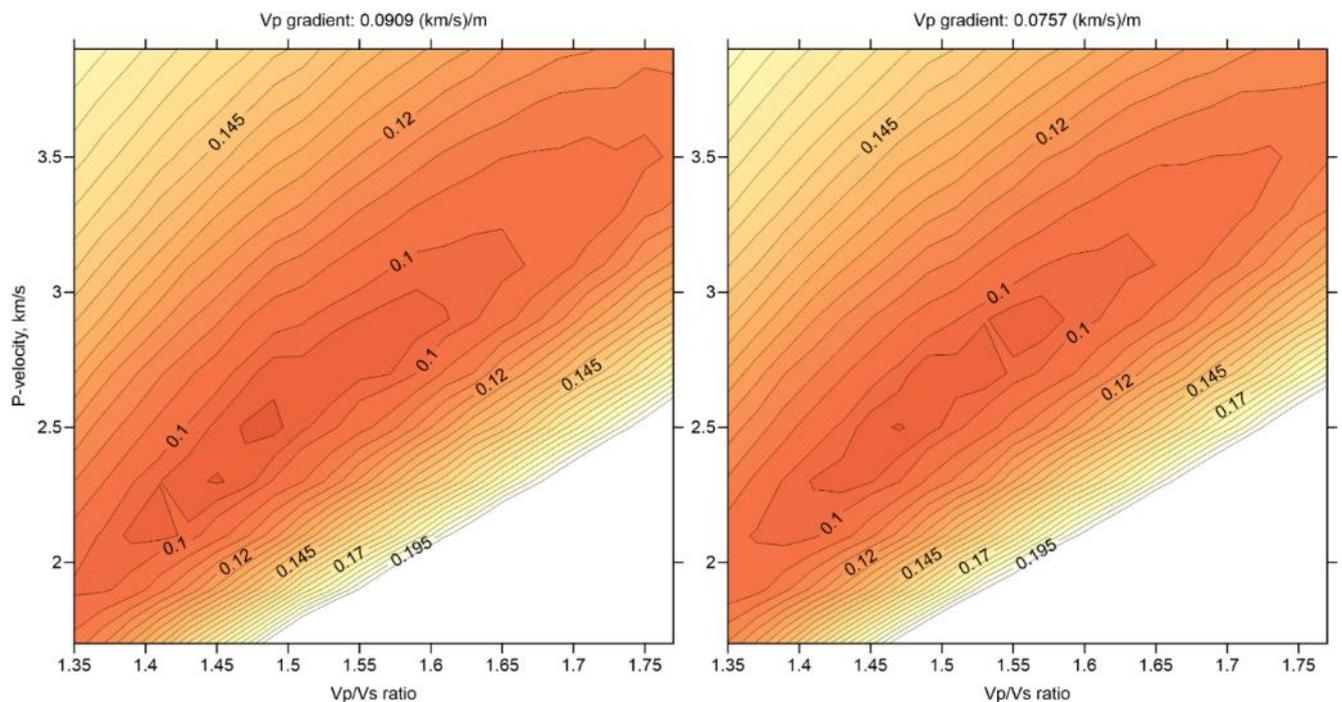


Рисунок 3.7 – Поиск оптимальной скоростной модели (минимизация средней абсолютной невязки). Скорости Р-волн изменялись от 1.7 до 3.9 км/с с шагом 0.2 километра, значение отношения V_p/V_s от 1.35 до 1.77 с шагом 0.02. В первом случае градиент изменения скорости Р-волн с глубиной составлял $\sim 0,09$ (км/с)/м, во втором - $\sim 0,076$ (км/с)/м. Значения на контурных линиях – невязки (сек.). Левая картинка – градиент изменения скорости продольной волны с глубиной – 0.0909 (км/с)/м, правая – 0.0757 (км/с)/м.

Дальнейшая оптимизация стартовой модели была произведена в процессе томографической инверсии. На основании результатов, полученных после нескольких итераций, рассчитывали средние значения скоростей Р и S-волн для глубин 0 и 4 километра. Далее вносили изменения в скоростную 1D модель и запускали новый цикл инверсии. В конечном итоге была получена оптимальная референтная модель, обеспечивающая баланс между положительными и отрицательными аномалиями (Таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Стартовая одномерная скоростная модель.

Глубина (км)	V_p (км/с)	V_s (км/с)
0	2,71	1,75
4	2,83	1,84

Стоит отметить, что в полученной оптимальной референтной модели среднее значение $V_p/V_s=1,53$, что является исключительно низким результатом, не характерным для активных вулканических областей.

Выборка данных в алгоритме была задана двумя критериями. Во-первых, общее количество вступлений P и S-волн на событие должно быть не менее 6, иначе землетрясение несет недостаточно информации для проведения томографии. Во-вторых, среднее значение ошибки в определении времени вступления не должно превышать 0,5 секунд. В результате, из 360 событий были выбраны 333 землетрясения, которые удовлетворяли заданным параметрам и насчитывали 1613 вступлений P-волн и 2421 вступлений S-волн. Таким образом, на одно землетрясение пришлось в среднем 12,1 вступлений, что является достаточным показателем для реализации томографической инверсии данных. Стоит отметить, что количество вступлений S-волн значительно превышает количество вступлений P-волн, что связано с сильной зашумленностью данных, в которых после фильтрации высокоамплитудные вступления S-волн выделялись более четко.

В программе LOTOS была использована узловая параметризация распределения скоростей. По горизонтали узлы равномерно распределены по области с расстоянием 0,5 километра друг от друга, в то время как в вертикальном направлении их распределение зависело от плотности лучей, но не менее 0,3 километра.

Инверсия была выполнена с использованием метода LSQR [Paige and Saunders, 1982; Nolet, 1987] одновременно для поправок скоростей dV_p и dV_s и параметров источника с поправками координат dx , dy , dz и времени в источнике – dt . Стоит отметить, что обычно код LOTOS включает в себя еще стационарные поправки, но в данной работе они не были использованы, что связано с

отсутствием аномалий непосредственно под станциями. Устойчивость инверсии также контролировали двумя дополнительно внесенными матричными блоками, которые регулировали амплитуду и сглаживали полученные аномалии скорости, подробное описание блоков представлено в главе 2. В данной работе значение амплитудного демпинга было равно 0, это связано с тем что такой же эффект достигается в процессе реализации нескольких итераций.

Как было описано в главе 2, полученная модель проходит через этапы 2, 4, 5 и 6 еще несколько раз, до получения конечной модели, в данном случае, количество итераций было равно 5. Величины невязок по ходу выполнения итеративной процедуры инверсии приведены в таблице 3.2. В итоге, для продольных и поперечных волн уменьшение невязок составляет 14% и 20%, соответственно, что является не лучшим показателем. Однако похожие результаты встречаются в других исследованиях вулканов [Koulakov et al., 2013; Kuznetsov and Koulakov, 2014]. Это может быть объяснено относительно небольшой областью исследования и короткими расстояниями, за которые лучи не успевают накопить большие невязки.

Таблица 3.2 – Средние абсолютные значения невязок для P и S-волн и их минимизация в процессе итераций.

Итерация	Средняя невязка P-волн (сек)	Изменение средней невязки P-волн (%)	Средняя невязка S-волн (сек)	Изменение средней невязки S-волн (%)
1	0,128	0	0,162	0
2	0,118	7,8	0,140	13,6
3	0,113	11,7	0,133	17,9
4	0,113	11,7	0,131	19,1
5	0,110	14,1	0,129	20,4

В результате томографической инверсии были получены трехмерные распределения скоростей P и S-волн в области под вулканом Горелый и положения гипоцентров землетрясений. Модели представлены в виде горизонтальных и вертикальных сечений, на которых изображены скоростные аномалии P и S-волн и отношение V_p/V_s . Основные и наиболее важные результаты показаны на рисунках 3.8 – 3.11.

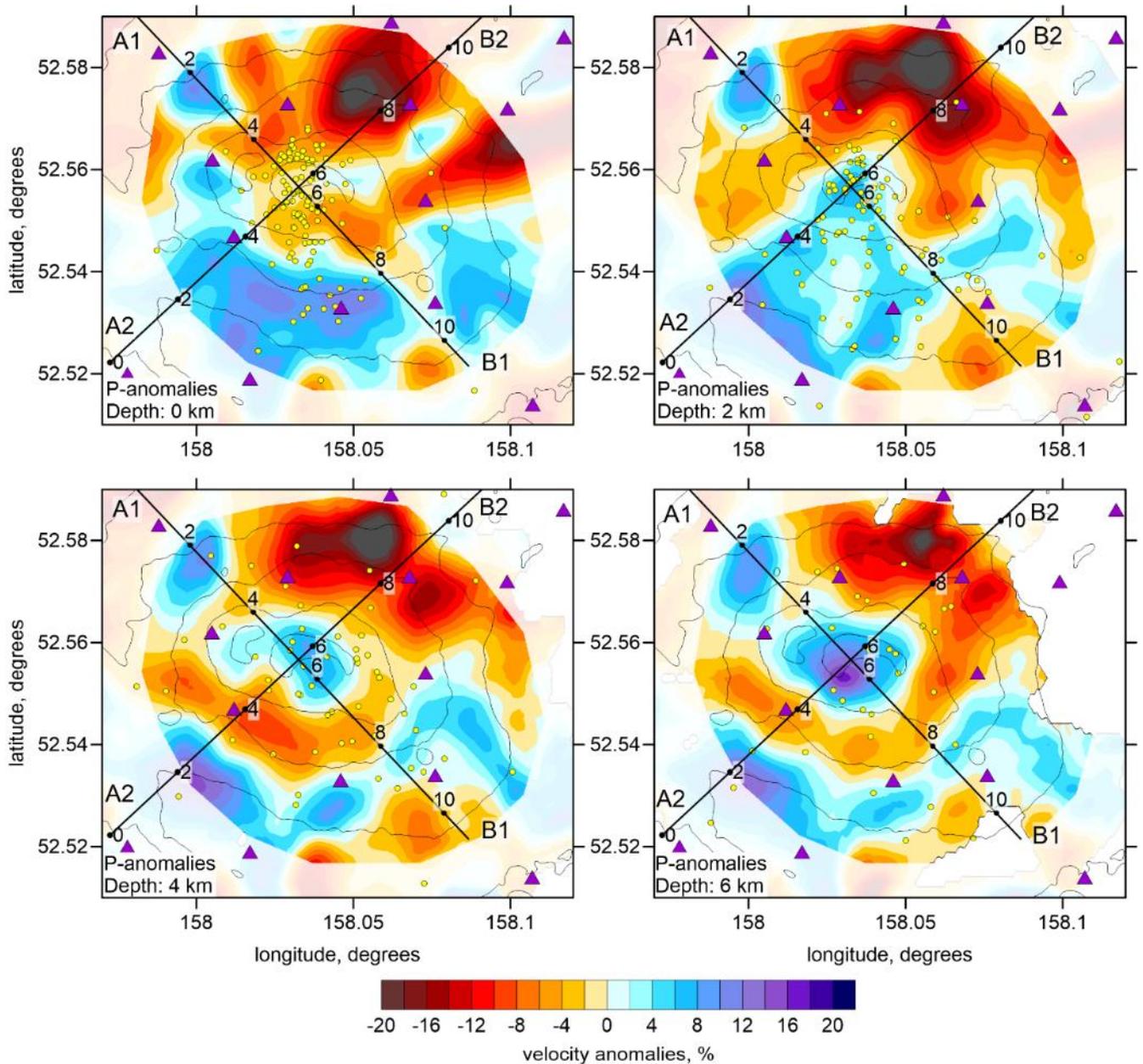


Рисунок 3.8 – Аномалии Р-волн. Горизонтальные сечения на глубинах – 0, 2, 4 и 6 километров. Фиолетовые треугольники – временные станции. Желтые точки – локализованные землетрясения на соответствующих глубинах. Черные линии – профили A1B1 и A2B2.

На рисунке 3.2.3 представлены полученные в ходе томографической инверсии модели для продольных волн. Они представлены в виде горизонтальных сечений на глубинах 0, 2, 4 и 6 километров ниже уровня моря. Через центр вулкана проходят два перпендикулярных друг другу профиля, по которым в дальнейшем будут построены модели по вертикальным сечениям. Видно, что непосредственно под вулканом на уровне моря аномалия Р-волны отрицательна, порядка -6%. С увеличением глубины аномалия скоростей изменяется на

положительную и доходит до +18%. В области вокруг вулкана выделяются преимущественно отрицательные аномалии до -20%, хотя на глубинах 0 и 2 километра в юго-западной части изначально имеются положительные отклонения скоростей продольных волн, до +12%.

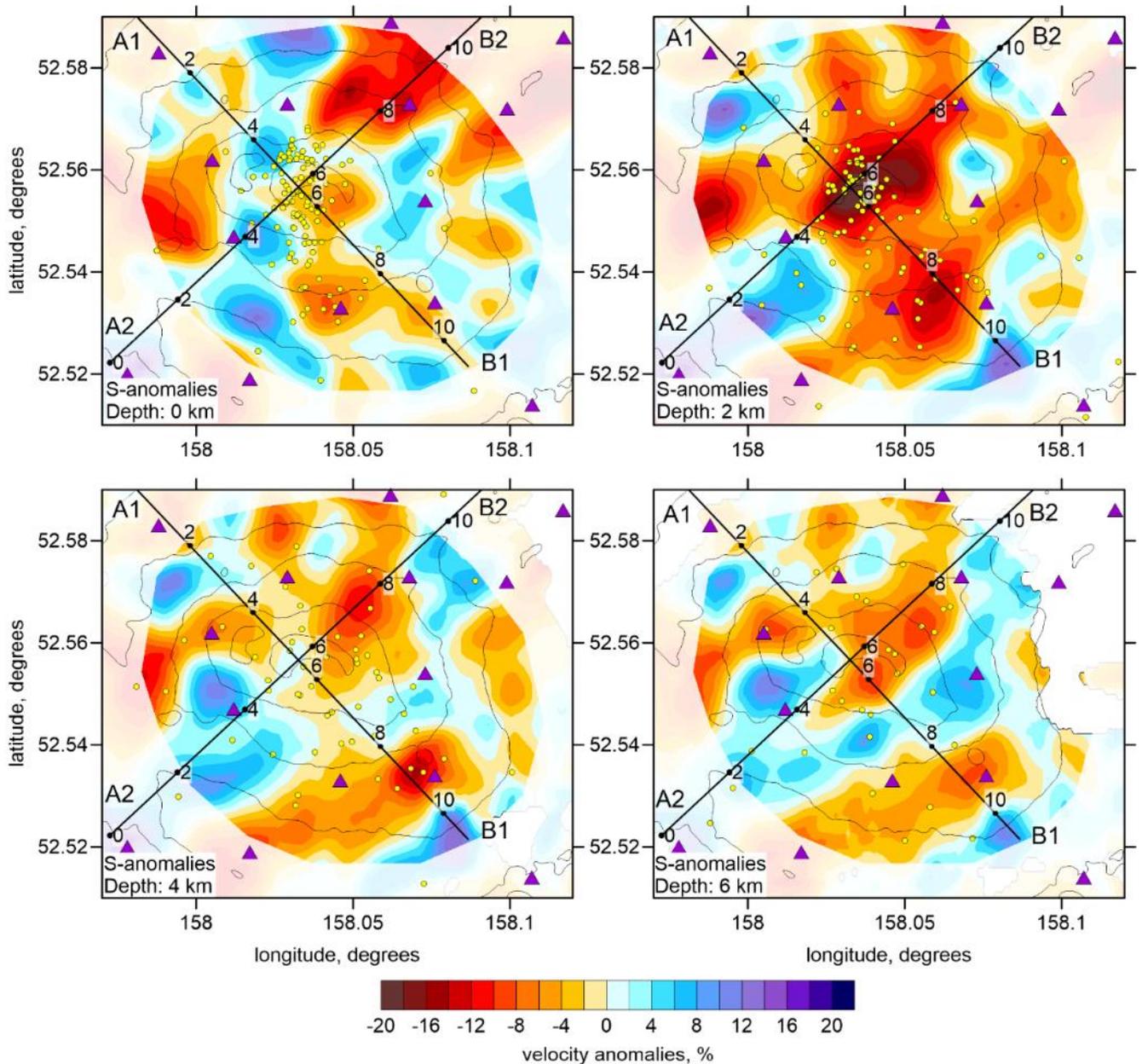


Рисунок 3.9 – Аномалии S-волн. Горизонтальные сечения на глубинах – 0, 2, 4 и 6 километров. Фиолетовые треугольники – временные станции. Желтые точки – локализованные землетрясения на соответствующих глубинах. Черные линии – профили A1B1 и A2B2.

Результаты для скоростей поперечных волн, представленные на рисунке 3.2.4, значительно отличаются. Для глубин 0, 4 и 6 километров ниже уровня моря выделяются отрицательные аномалии S скоростей под постройкой вулкана, от 0%

до -6%. Вокруг вулкана на этих глубинах имеются как слабо положительные, так и слабо отрицательные области, аномалии варьируются от -6% до +8%. Отдельно стоит рассмотреть глубину 2 километра ниже уровня моря. Непосредственно под центральной постройкой наблюдается сильная отрицательная аномалия S-скоростей, -20%. Она охватывает и прилегающую территорию вулкана Горелый, слабея на периферии до -2%. Внутри этой аномалии наблюдаются зоны с небольшими положительными отклонениями S скоростей, около +6%.

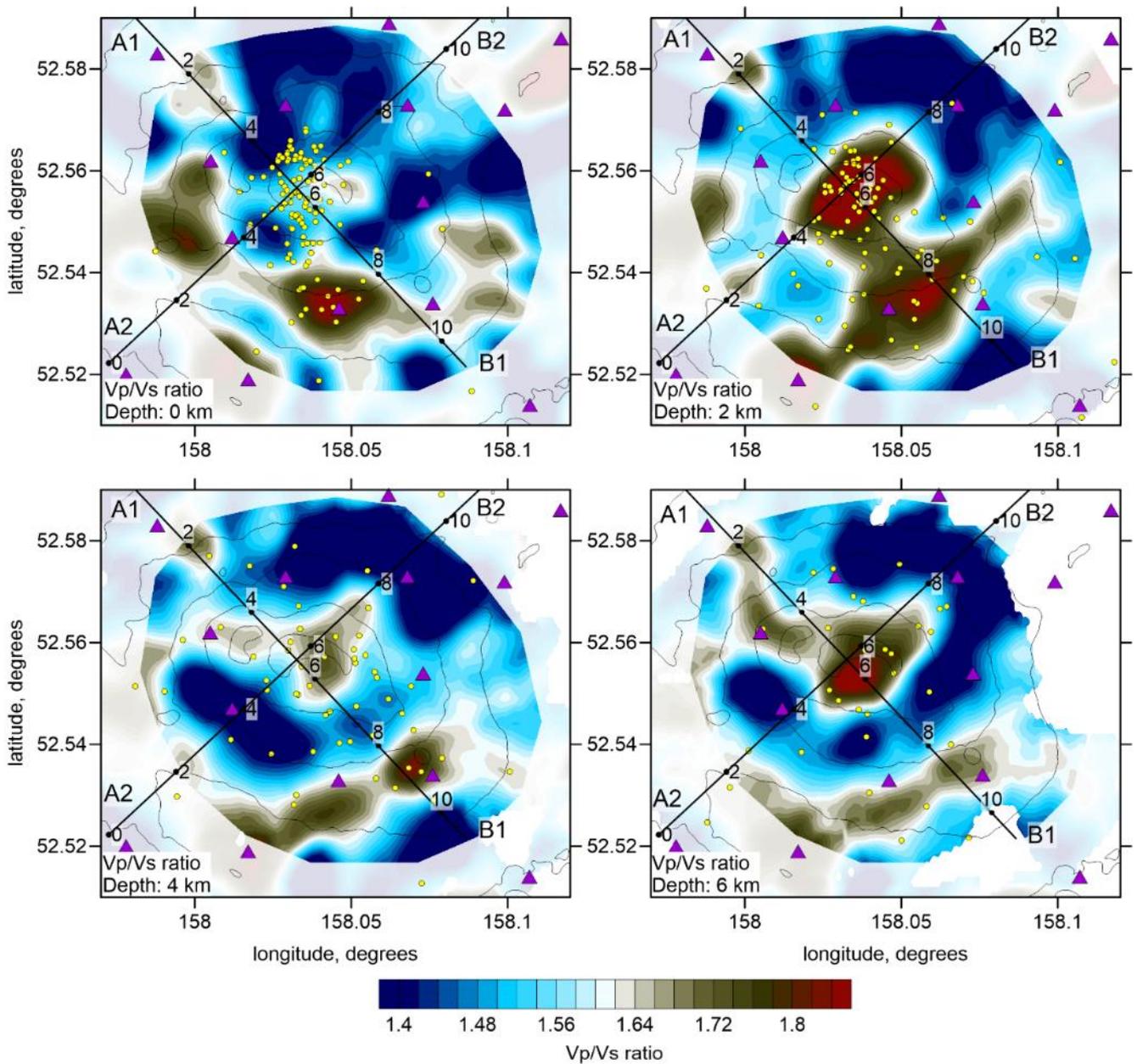


Рисунок 3.10 – Отношение V_p/V_s . Горизонтальные сечения на глубинах – 0, 2, 4 и 6 километров. Фиолетовые треугольники – временные станции. Желтые точки – локализованные землетрясения на соответствующих глубинах. Черные линии – профили A1B1 и A2B2.

Алгоритм программы LOTOS позволяет рассчитывать значения отношения V_p/V_s , что представлено на моделях на рисунке 3.2.5. На уровне моря под вулканом наблюдается низкое значение $V_p/V_s=1,6$, которое увеличивается с глубиной. Максимальное значение, равное 2, наблюдается на глубине 2 километра, более того, соизмеримая по величине аномалия с чуть меньшими значениями наблюдается на юго-востоке недалеко от вулкана Горелый, в сторону вулкана Мутновский. В области вокруг вулкана на всех глубинах преобладают низкие значения отношения V_p/V_s , местами достигая критического уровня 1,4.

На горизонтальных сечениях можно наблюдать два перпендикулярных профиля, проходящих через центр постройки вулкана Горелый. По данным сечениям строились вертикальные модели для P и S скоростей, и отношения V_p/V_s , что представлено на рисунке 3.11.

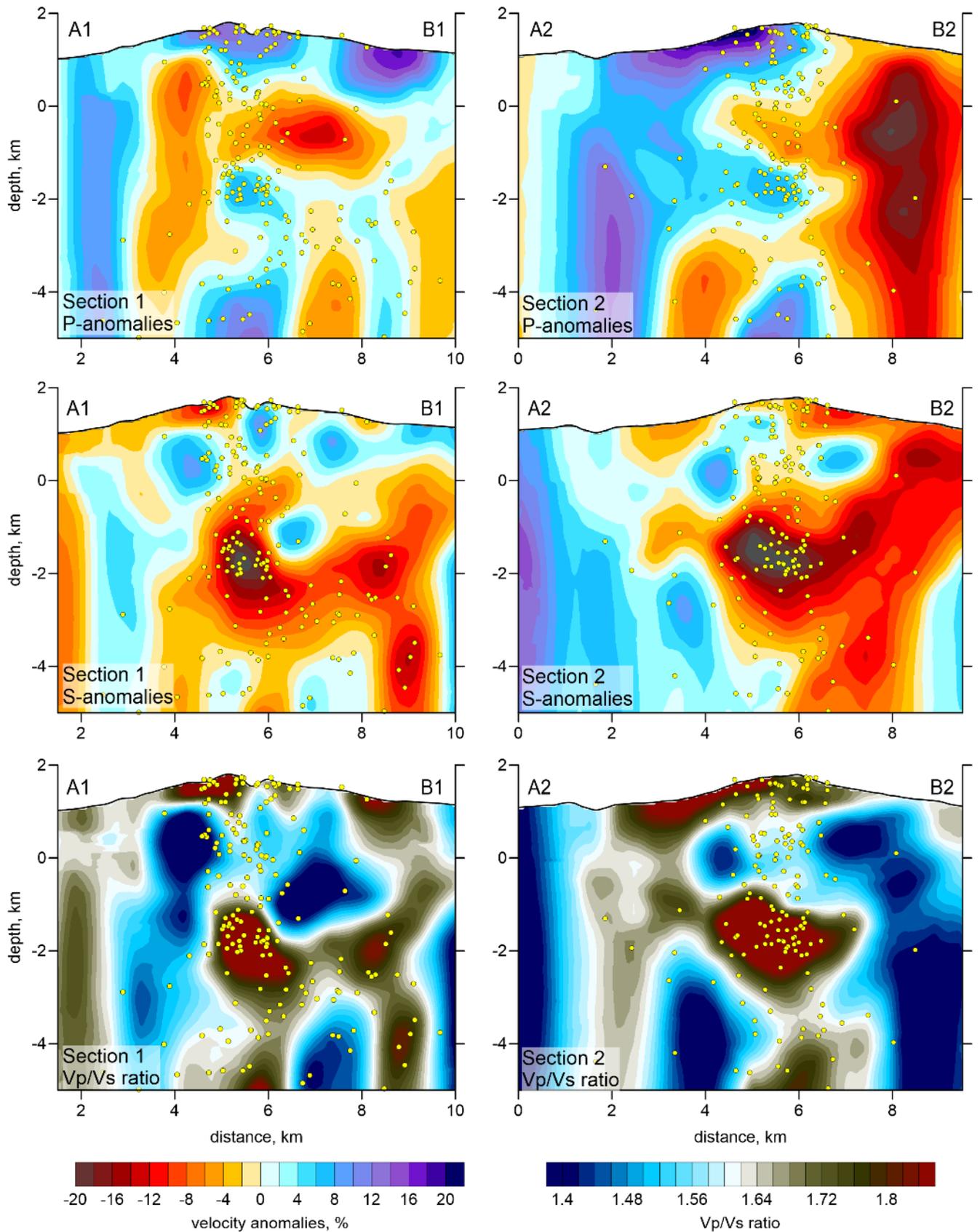


Рисунок 3.11 – Вертикальные сечения по профилям A1B1 и A2B2 до глубины 5 километров. Желтые точки – проекция локализованных землетрясений на плоскость профиля. Отмечены все события находящиеся на расстоянии 5 километров от профиля.

В первую очередь стоит отметить, что модели построены до глубины 5 километров ниже уровня моря, что связано с расположением большинства гипоцентров землетрясений выше этой глубины. При обработке данных были также получены результаты ниже этой границы, но из-за нехватки информации, малой плотности лучей, разрешающая способность ниже этой границы сильно падает, поэтому было принято решение ограничиться этой глубиной.

В приповерхностных слоях на склонах вулкана по обоим профилям наблюдаются сильные положительные аномалии P скоростей, до +18%, и слабые отрицательные аномалии S скоростей, до -8%. В этой области можно наблюдать высокие значения отношения V_p/V_s , варьирующиеся от 1,8 до 2.

Непосредственно под вулканом Горелый, для P скоростей, на глубинах от 0 до 1,5 километра ниже уровня моря, выделяется отрицательная аномалия, до -10%. На других глубинах видны преимущественно слабые положительные аномалии, до +6%. Схожая ситуация наблюдается для S скоростей, имеется более крупная аномалия, от 0 до 2,5 километров ниже уровня моря. Она сильнее, чем для P скоростей, и достигает до -20%. В остальных областях ситуация, как и с P скоростями, слабые положительные аномалии до +6%.

На моделях отношения V_p/V_s , стоит отметить большую область с высокими значениями, до 2, на глубине от 1 до 3 километров ниже уровня моря. Вокруг этой аномалии выделяются множество зон с низкими значениями отношения V_p/V_s , до 1,4.

В итоге, по результатам анализа, аномалии P скоростей варьируются от -15% до +20, а аномалии S скоростей изменяются от -20% до +12%. Под вулканом Горелый с увеличением глубины отрицательная аномалия P -волны изменяется на положительную, в то время как для S -волны она всегда отрицательна. Такая картина является типичной для активных вулканов, например, вулкан Попокатепетль (Мексика) [Kuznetsov and Koulikov, 2014], вулкан Спурр (Аляска) [Koulikov et al., 2013] и другие. Значения отношения V_p/V_s варьируются от 1,4 до 2. Основные выделяемые аномалии представляют собой зону с высоким

значением V_p/V_s под вулканом на глубине 2-2,5 километра ниже уровня моря, и зоны с низкими значениями V_p/V_s , которые находятся на глубине 1-2,5 километра ниже поверхности вулкана Горелый. Интерпретация полученных результатов представлена в разделе 3.4.

Качество полученных результатов было проверено серией синтетических тестов, представленных в следующем параграфе.

3.3 Синтетическое моделирование. Результаты тестов

Как было сказано ранее, в параграфе 2.5, синтетические тесты позволяют оценить разрешающую способность системы наблюдения, качество получаемых значений амплитуды аномалий и подобрать оптимальные коэффициенты регуляризации и сглаживания. Времена пробега лучей были вычислены с помощью алгоритма «bending» - методом изгиба в трехмерном пространстве. К полученным временам пробега был добавлен случайный шум, в нашем случае мы использовали значение со средней величиной 0,1 секунды, что соответствовало средней ошибке определения времен прихода P и S-волн в реальном случае. Конфигурация источников, приемников и прочие параметры настроек программы LOTOS были такими же, что и при инверсии реальных данных.

Проверка горизонтальной разрешающей способности была проведена с помощью теста - «шахматная доска». Чередующиеся положительные и отрицательные аномалии с амплитудами $\pm 14\%$ квадратной формы, располагались вплотную к друг другу. Рассматривались три различные модели с размерами аномалий 1,5, 2 и 2,5 километра. По вертикали они представляли из себя бесконечные колонны с постоянным значением отклонения амплитуды. Результаты этого теста приведены на глубине 2 километра ниже уровня моря и представлены на рисунке 3.12. Можно наблюдать, что при восстановлении аномалий размером 1,5 км в некоторых местах видно размытие и нечеткие границы. Более крупные аномалии были восстановлены более надежно по всей области исследования.

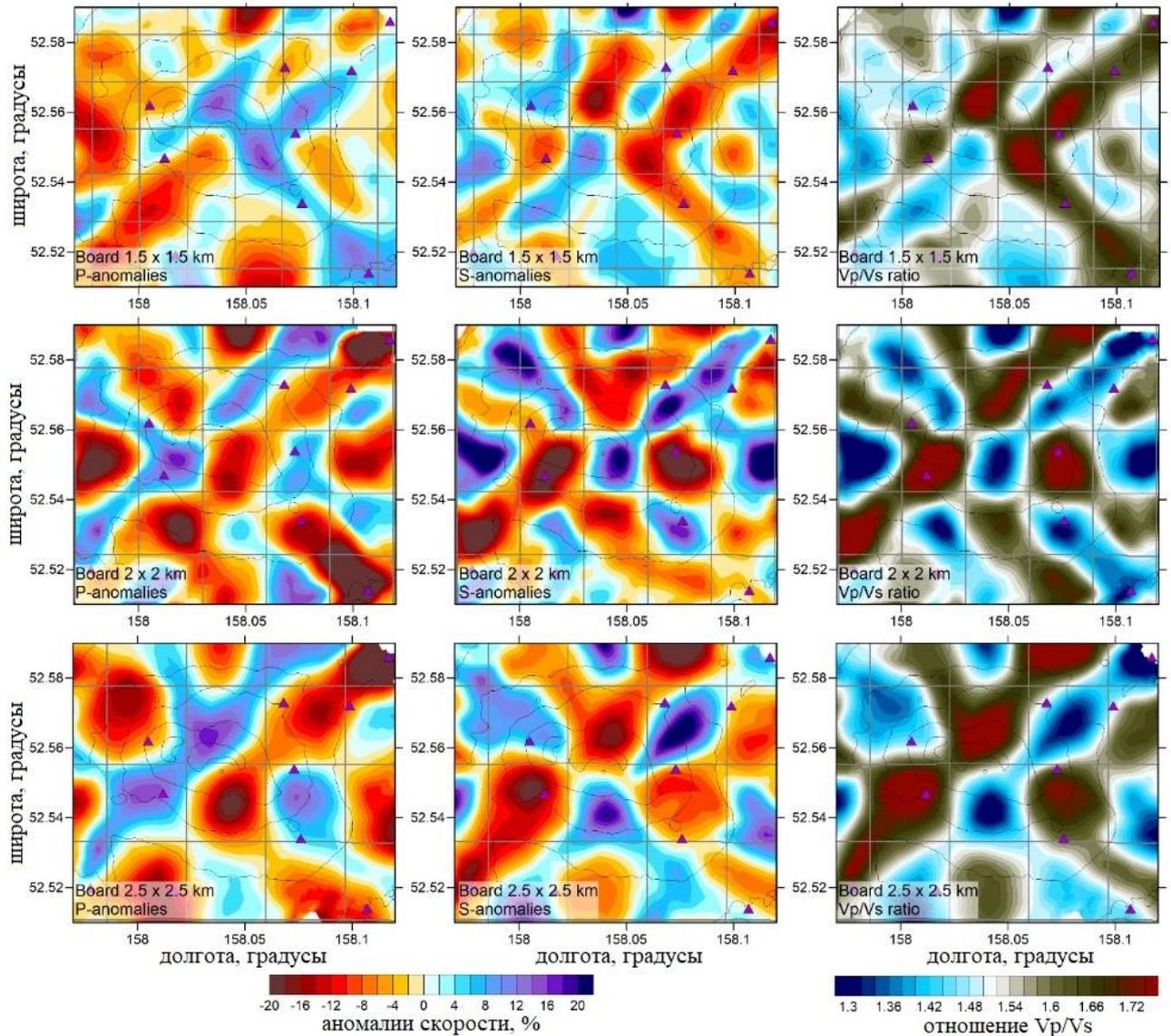


Рисунок 3.12 – Синтетический тест с «шахматной доской». Три верхних изображения – размер аномалий 1,5 км., средние - 2 км., нижние – 2,5 км. Слева на право, для P-волн, S-волн и V_p/V_s , соответственно. Глубина сечения для всех изображений – 2 км ниже уровня моря. Фиолетовые треугольники – временные станции.

Синтетические тесты для проверки разрешения в вертикальном направлении были реализованы немного иначе. Для этого теста синтетические аномалии были заданы на двух вертикальных профилях, которые также были использованы для представления основных результатов инверсии реальных данных. В плоскости профиля были заданы квадратные аномалии со стороной 1 километр и амплитудами $\pm 14\%$. Расстояние между ними составляло также 1 километр. Для каждого профиля задание аномалий и их восстановление был произведено в рамках независимых моделей. Стоит отметить, что разрешающая способность по

вертикали ниже, чем по горизонтали, что связано с неоднозначностью определения параметров источника (главным образом, глубины и времени t_0) и восстанавливаемыми скоростными аномалиями. Результаты вертикальных синтетических тестов представлены на рисунке 3.13.

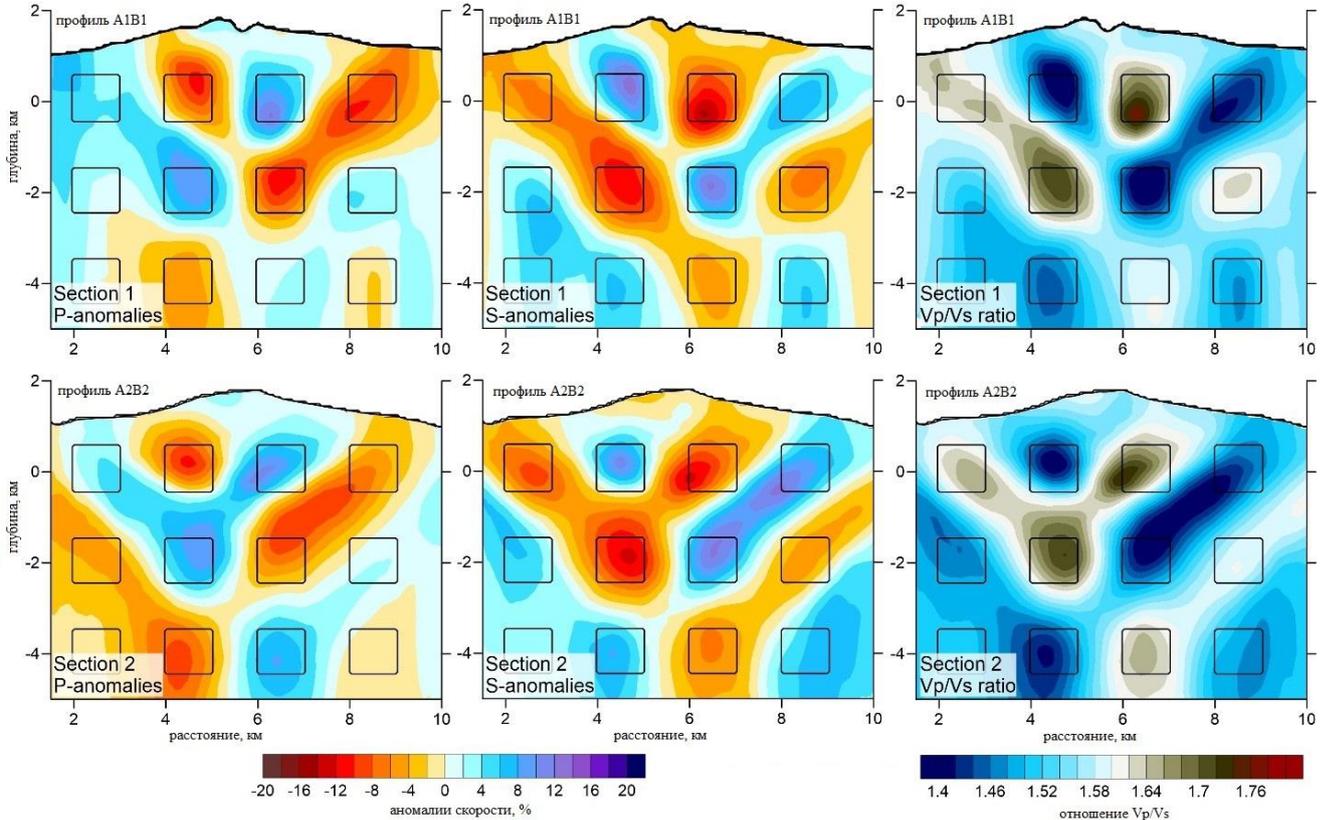


Рисунок 3.13 – Синтетический тест с «шахматной доской» для вертикального сечения по двум профилям, проходящим через вершину вулкана. Три верхних изображения – первый профиль, нижние – второй профиль. Для P-волн, S-волн и V_p/V_s (слева на право). Черными контурами показаны расположения и размеры аномалий.

Как видно, оба результата содержат значительное диагональное размытие, что является типичной картиной для такой системы наблюдения. Однако, непосредственно под вершиной вулкана Горелый имеется достаточное разрешение, чтобы восстановить все три уровня аномалий.

Таким образом, основные аномалии в полученных скоростных моделях, которые будут анализироваться в следующей главе, можно считать надежными и правдоподобными.

3.4 Интерпретация полученных результатов

Результаты обработки реальных данных методом локальной сейсмической томографии были представлены в параграфе 3.2 на рисунках 3.8 – 3.11. На них приведены значения аномалий скоростей P и S волн, отношение V_p/V_s , а также гипоцентры землетрясений в окрестности соответствующих горизонтальных и вертикальных сечений.

Прежде всего, следует напомнить, что используемая референтная модель, обеспечивающая максимальное соответствие модельных и наблюдаемых данных, обладает низким средним значением V_p/V_s равным 1,53. При этом можно видеть, что в некоторых частях изучаемой области величина отношения может достигать и более низких значений, до 1,4 (Рисунок 3.14).

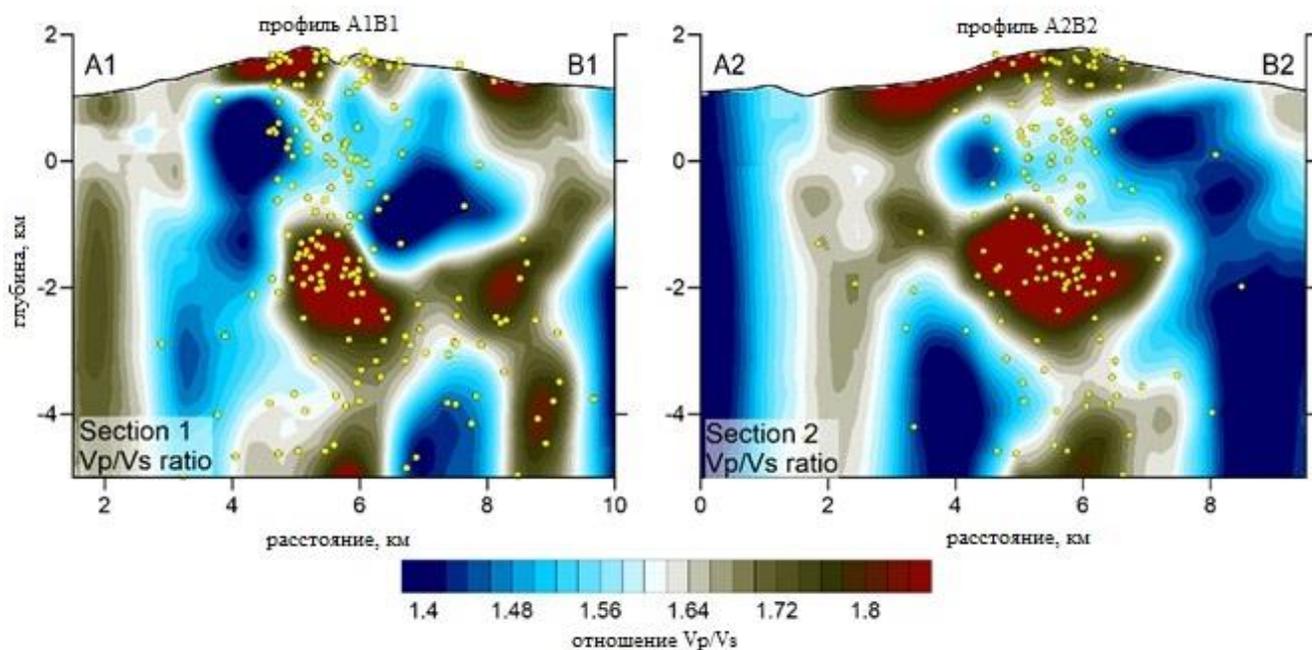


Рисунок 3.14 – Основные результаты локальной томографии для отношения V_p/V_s . Вертикальные сечения по профилям A1B1 и A2B2 до глубины 5 километров, их расположение изображено на рисунке 3.2.3. Желтые точки – проекция локализованных землетрясений на плоскость профиля.

Также, используемая стартовая скоростная модель имеет низкие скорости продольных волн. До глубины 4 километра ниже уровня моря – 2,71 км/с, ниже – 2,83 км/с. С увеличением глубины, скорость объемных волн будет значительно увеличиваться, но в данном исследовании это не важно, потому что основное

количество гипоцентров землетрясений находятся до глубины 6 километров ниже уровня моря. Предположительно, низкие скорости обусловлены расположением вулкана Горелый в кальдере, которая образовалась при извержении намного более крупного древнего вулкана прото-Горелый, и которая состоит из пористых пирокластических пород этого извержения, таких как туфы, брекчии, пористые пемзы и различный вулканический песок [Селянгин и Пономарева, 1999]

Как показано на физических экспериментах [Takei, 2002] и полевых экспериментах [Chatterjee et al., 1985], вариации отношения V_p/V_s оказываются чувствительными к пористости среды и наличию в ней газа или жидкости. Так, в случае заполнения трещин и пор несжимаемой жидкостью, при линейном сжатии упругие коэффициенты не сильно отличаются от твердого тела. В это же время наличие жидкости приводит к сильному понижению трения на трещинах, что вызывает уменьшение сдвиговых упругих параметров и понижение скорости поперечных волн. В результате, в среде, насыщенной жидкостью, будет наблюдаться высокое отношение V_p/V_s .

С другой стороны, в случае насыщения пор легко сжимаемым газом, модуль сжатия такого губкообразного тела будет низким и, соответственно, продольные скорости могут достигать очень низких значений. При этом, если среда остается сухой, трение на трещинах, а значит и модуль сдвига, остается высоким. Все это приводит к незначительному снижению скорости S волны и, соответственно, к низкому отношению V_p/V_s . По-видимому, именно эта ситуация имеет место в породах под вулканом Горелый. Как отмечалось, из вулкана выходит значительное количество газов общей массой около 11000 тонн ежедневно [Aiyra et al., 2012]. Такое значительное количество газа, очевидно, содержится в порах и трещинах под вулканом, что и приводит к понижению отношения V_p/V_s . Судя по результатам томографии, максимальная концентрация газов наблюдается в верхних слоях под вулканом и по бокам основного конуса вулкана (Рисунок 3.15).

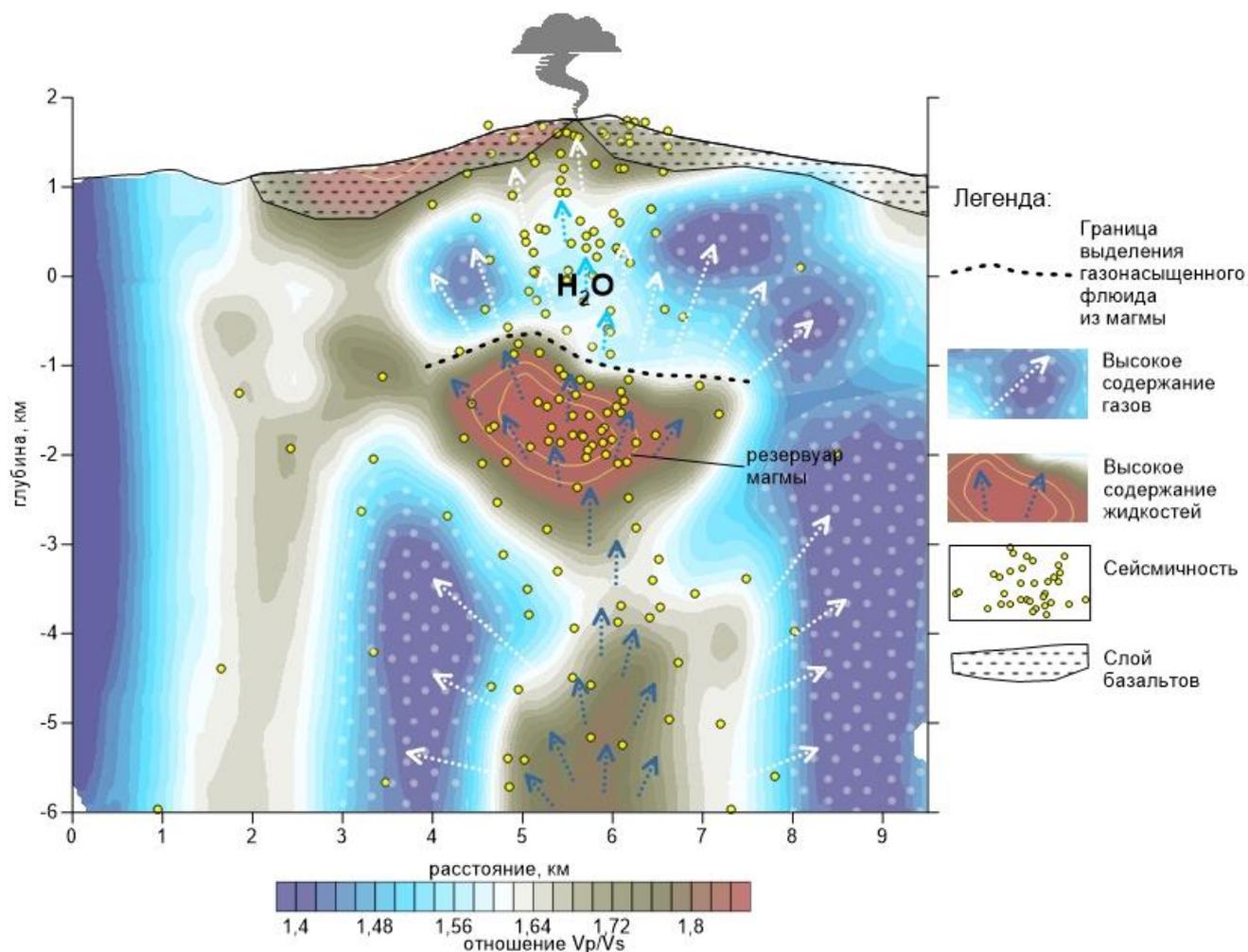


Рисунок 3.15 – Интерпретация основных результатов по томографической инверсии. Область с повышенным значением V_p/V_s , до 2, предположительно, это породы, насыщенные расплавом. Зоны, располагающиеся выше и вокруг, с низкими значениями V_p/V_s , до 1,4, предположительно газонасыщены. Желтые точки – гипоцентры землетрясений. Пунктирная линия – граница, где предполагается происходит процесс выделения газонасыщенного флюида из магмы.

Аналогичная связь между значением соотношения V_p/V_s и наличием жидких и газообразных флюидов была отмечена и в других вулканических областях. Так, томографическая модель, построенная для Флегрейских полей в Италии [De Siena et al., 2010] выявила четкую связь между расположениями фумарольных полей и пониженными значениями отношения V_p/V_s . Схожие признаки насыщенности изучаемой области газом были обнаружены под кальдерой Йеллоустона [Chatterjee et al., 1985]. Под вулканом Наруко в Японии была обнаружена столбчатая аномалия с низким значением отношения V_p/V_s [Nakajima and Hasegawa, 2003], что предположительно указывает на канал дегазированных

летучих веществ. Аналогичная зона аномалий была обнаружена под поверхностью вулкана Невадо-дель-Руис в Колумбии [Vargas et al., 2017]. Авторы объясняют данный результат газонасыщением поверхностных пород, что связано с высокой газовой эмиссией вулкана на тот момент.

Немаловажным результатом является выделение под вулканом аномалии с высоким значением отношения V_p/V_s , достигающего 2 (Рисунок 3.15). Глубина залегания данной зоны, примерно, 1,5-2 километра ниже уровня моря. Выделенная область характеризуется высокоскоростной аномалией Р-волн и низкоскоростной аномалией S-волн. Такая картина является достаточно типичной для активных вулканов, что можно увидеть в работе по изучению вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке [Koulakov et al., 2017], вулкана Спурр на Аляске [Koulakov et al., 2013], вулкана Невадо-дель-Руис в Колумбии [Vargas et al., 2017] и базальтового поля Харрат Лунайр в Саудовской Аравии [Koulakov et al., 2014a] и пр. Такое влияние может оказывать наличие расплава/флюида в порах/трещинах магматических пород присутствующих в этой зоне. Одновременное наличие высокого значения V_p , низкого значения V_s , и в следствие чего очень высокого значения V_p/V_s , часто считается показателем наличия активного магматического резервуара [Koulakov et al., 2017]. В случае с вулканом Горелый, обнаруженный резервуар, может являться источником магматических извержений [Siebert et al., 2010].

Вокруг аномалии с высокими значениями V_p/V_s находятся зоны с низким значением V_p/V_s , достигающие местами - 1.4. Это может быть объяснено наличием газа в порах/трещинах пород. Присутствие большого количества газа или газонасыщенного флюида в структуре подтверждается тем, что в период исследования из кратера вулкана выходило значительное количество газов общей массой около 11000 тонн ежедневно [Ajiuppa et al., 2012]. Также, исследование [Gavrilenko et al., 2016] показало, что под вулканом происходит процесс дегазации, при котором выделяется вода. Данный результат был получен путем сравнения количества воды в извергнутой магме вулкана Горелый и оливин-

содержащих породах [Назарова и др., 2017]. С помощью метода сейсмической томографии невозможно увидеть данный динамический процесс, тем не менее, его важно учитывать при интерпретации результатов.

На глубине 1-1,5 километра ниже уровня моря выделяется граница с резкой сменой значения V_p/V_s . Предположительно, на этой глубине происходит выделение газонасыщенного флюида из магмы. Температура на глубине расположения границы составляет 1000-1100С° [Gavrilenko et al., 2016]. При такой температуре происходит выделение флюида с летучими компонентами [Scaillet and Pichavant, 2003], что приводит к увеличению температуры плавления магмы, вследствие чего она начинает кристаллизоваться и закупоривать поры/трещины. Предположительно, прорыв флюида через заблокированные поры вызывает сейсмичность в данной области, что подтверждается результатами локализации источников землетрясений. Основная их концентрация начинается в аномалии с повышенным отношением V_p/V_s и распространяется до поверхности вулкана.

Стоит отметить, что в работе по вулкану Спурр на Аляске [Koulakov et al., 2013b] была обнаружена схожая с вулканом Горелый общая картина (Рисунок 3.16).

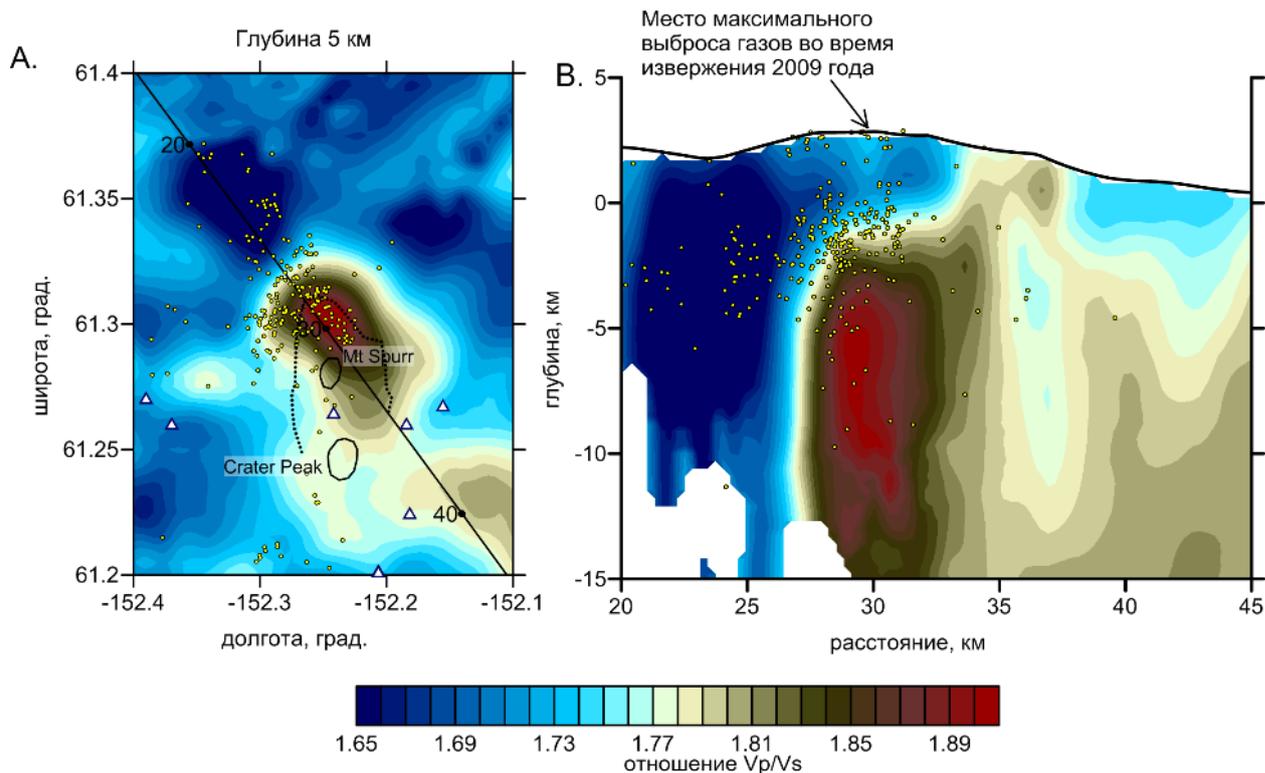


Рисунок 3.16 – Результат томографической инверсии на вулкане Спурр на Аляске [Koulakov et al., 2013b]. Приведены значения соотношения V_p/V_s на глубине 5 км и вертикальном сечении. Желтые точки показывают положения землетрясении. Синие треугольники – станции.

В тот момент, которому соответствует рассчитанная модель, происходила активизация вулкана Спурр с проявлением интенсивной фумарольной деятельности в главном кратере и сейсмической активности. Результаты томографии показали, что под точкой выхода газов с больших глубин прослеживается вертикально вытянутая аномалия с повышенными значениями V_p/V_s (повышенные скорости продольных и пониженные поперечных волн). Однако на глубине около 3 км под поверхностью вулкана эти значения сменяются пониженным значением отношения V_p/V_s . Зона перехода сопровождается активной сейсмичностью, что можно объяснить тем, что из магмы начинается выделяться газонасыщенный флюид. На поверхности в это время наблюдался мощный выброс газов, сравнимый по интенсивности с фумарольной активностью на вулкане Горелый. Следует, однако, упомянуть, что масштабы исследований в этих двух случаях были разные, что определяет различные значения базовых отношений V_p/V_s . Если в случае вулкана Горелый

рассматривается область глубиной несколько километров, то в случае вулкана Спурр область охватывает, практически, всю кору, что и определяет различие референтных моделей. Несмотря на различие масштабов, в этих двух случаях наблюдаются схожие структуры и процессы, что позволяет говорить о едином механизме, контролирующем газовыделение на вулкане Горелый и других вулканах мира.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель данной работы заключалась в изучении геологической структуры вулкана Горелый используя метод пассивной сейсмической томографии. Для этого были поставлены несколько научных задач:

- получить распределение гипоцентров локальных землетрясений под вулканом Горелый.
- построить трехмерные скоростные модели продольных и поперечных сейсмических волн в верхней коре вулкана Горелый, используя данные с временной сети станций и метод пассивной сейсмической томографии.
- произвести геологическую интерпретацию результатов, полученных в ходе томографической инверсии.

Благодаря установке временной сейсмической сети на вулкане Горелый, состоящей из 21 станции, впервые удалось получить пространственное распределение сейсмичности и построить трехмерную сейсмическую модель под этим вулканом. На волновых формах были сняты времена вступлений P- и S-волн, с данных за полгода наблюдений. В итоге, удалось выделить 360 землетрясений, из которых 333 события удовлетворяли заданным критериям отбора и насчитывали 1613 вступлений P-волн и 2421 вступление S-волн. Это обеспечило среднее количество фаз на событие 12,1, что является достаточным показателем для реализации томографической инверсии.

На основании этих данных была построена скоростная модель, включающая трехмерные распределения скоростей P и S волн, а также отношения V_p/V_s . Достоверность и удовлетворительное пространственное разрешение этих моделей были доказаны с помощью серии синтетических тестов. В ходе анализа полученных трехмерных скоростных моделей продольных и поперечных сейсмических волн было получено, что используемая референтная модель имеет низкое среднее значение отношения $V_p/V_s=1,53$. На глубине 1,5-2 километра ниже уровня моря выделяется область с высоким значением $V_p/V_s - 2$, вокруг

которой находятся зоны с низким значением V_p/V_s , достигающие местами - 1.4. Также анализ скоростной модели показал, что на глубине 1-1,5 километра ниже уровня моря выделяется граница с резкой сменой значения V_p/V_s .

Низкое среднее значение V_p/V_s обусловлено преобладанием зон с низким значением V_p/V_s , что в свою очередь возможно обусловлено высокой пористостью вулканических пород, которые насыщены газом. Ссылаясь на сторонние работы, стоит отметить, что в момент исследования под вулканом происходил процесс дегазации воды из магмы, которая в большом количестве выходила из главного кратера вместе с другими газами, около 11000 тонн в сутки. Повышенное значение отношения V_p/V_s , до 2, на глубине 1,5-2 километра ниже уровня моря, наоборот, может быть связано с наличием жидких флюидов. На глубине 1-1,5 километра ниже уровня моря, где выделяется граница с резкой сменой значения V_p/V_s , предположительно, происходит выделение газонасыщенного флюида из магмы. Выделение флюида с летучими компонентами приводит к увеличению температуры плавления магмы, вследствие чего она начинает кристаллизоваться и закупоривать поры/трещины, что возможно, приводит к сейсмичности, которая сконцентрирована в аномалии с повышенным значением отношением V_p/V_s и распространяется до поверхности вулкана.

В исследовании проводится аналогия с вулканом Спурр на Аляске, где наблюдался сходный по интенсивности выброс газов, и томографическая модель показывает похожие особенности в распределении отношения V_p/V_s и сейсмичности.

В дальнейшей своей работе автор планирует продолжить изучение активных вулканических структур, для исследования механизмов и процессов, протекающих в них. Это позволит набрать большее количество статистических данных и сопоставить их с уже имеющимися результатами. Также, для улучшения качества результатов, автор планирует расширить количество применяемых методов сейсмической томографии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абросимова Н. А. Геохимия газогидротермальных источников вулканов Эбеко и Мутновский: дис. на соискание ученой степени к. г.- м. н.: 25.00.03, 25.00.09: защищена 22.04.13 / Абросимова Наталья Александровна. – ИНГГ СО РАН. – 2013.
2. Авдейко, Г. П. Тектоническое развитие и вулканотектоническое районирование Курило-Камчатской островодужной системы / Г. П. Авдейко, С. В. Попруженко, А. А. Палуева // Геотектоника. – 2002. – №. 4. – С. 64-80.
3. Алексеев, А. С. Численный метод определения структуры верхней мантии Земли / А. С. Алексеев, М. М. Лаврентьев, Р. Г. Мухометов // Математические проблемы геофизики. – 1979. – №. 2. – С.143-165.
4. Алексеев, А. С. Численный метод решения трёхмерной обратной задачи сейсмологии / А. С. Алексеев, М. М. Лаврентьев, Р. Г. Мухометов, В. Г. Романов // Математические проблемы геофизики. – 1969. – №. 1. – С.179-202
5. Аносов, Г. И. Строение земной коры по профилю Камчатка-Океан и некоторые вопросы глубинного строения Восточного вулканического пояса / Г. И. Аносов, С. Т. Балеста, Ю. А. Будянский, В. К. Утнасин // Геодинамика вулканизма и гидротермального процесса. Петропавловск-Камчатский. – 1974. – С. 39.
6. Аносов, Г. И. Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки / Г. И. Аносов, С. К. Биккенина, А. А. Попов – Москва: Наука, 1978.
7. Балеста, С. Т. Сейсмическая модель Авачинского вулкана (по данным КМПВ-ГСЗ) / С. Т. Балеста, Л. И. Гонтовая, А. А. Каргопольцев, В. Г. Пушкарев, С. Л. Сеньюков // Вулканология и сейсмология. – 1988. – №. 2. – С. 43-55.
8. Балеста, С. Т. Сейсмическая модель земной коры Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода в районе Камчатки / С. Т. Балеста, Л. И. Гонтовая // Вулканология и сейсмология. – 1985. – №. 4. – С. 83-90.

9. Берсенева, Н.Ю. Сейсмичность вулкана Горелый, Камчатка, в 2007-2013 гг / Н. Ю. Берсенева, О. В. Соболевская // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. IV регион. науч.-техн. конф. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН. – 2013.
10. Бортникова, С. Б. Газогидротермы активных вулканов Камчатки и Курильских островов: состав, строение, генезис / С. Б. Бортникова, Е. П. Бессонова, М. П. Гора, А. Я. Шевко, Г. Л. Панин, И. Н. Ельцов, Р. В. Жарков, Т. А. Котенко, С. П. Бортникова, Ю. А. Манштейн, Л. В. Котенко, Д. Н. Козлов, Н. А. Абросимова, Ю. Г. Карин, Е. В. Поспеева, А. Ю. Казанский / отв. ред. О. Л. Гаськова, А. К. Манштейн // Рос. Акад. Наук, Сиб. Отд-ние, Ин-т нефтегазовой геологии и геофизики им. Трофимука А.А. – Новосибирск, ИНГГ СО РАН, – 2013. – С. 282. – ISBN 978-5-4262-0038-8.
11. Будников, В. А. Извержение вулкана Горелый в апреле 1986 г. / В. А. Будников // Вулканонология и сейсмология. – 1988. – №. 4. – С. 99-103.
12. Гавриленко, Г. М. Современное состояние термального озера в активном кратере вулкана Горелый (Камчатка) / Г. М. Гавриленко, Д. В. Мельников, А. А. Овсянников // Материалы Всероссийской научной конференции к. – 2008. – С. 1908-1910.
13. Гавриленко, М. Г. Вулкан Горелый – эволюция магматических расплавов / М. Г. Гавриленко, А. Ю. Озеров // Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. – 2009. – С. 22-27.
14. Гарбузова, В. Т. Обновленная классификация вулканических землетрясений П. И. Токарева / В. Т. Гарбузова, О. В. Соболевская // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. II регион. науч.-техн. конф. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН. – 2010. – С. 25-29.
15. Гервер, М. Д. Исследование неоднозначности при определении по годографу скорости распространения сейсмической волны / М. Д. Гервер, В. М. Марушкевич // Докл. АН СССР. – 1965. – Т. 163. – №. 6. – С. 1337-1380.

16. Гонтовая, Л. И. О скоростной объемной модели литосферы Восточной Камчатки (по данным сейсмической томографии) / Л. И. Гонтовая, И. А. Санина, С. Л. Сенюков, М. Ю. Степанова // Вулканология и сейсмология. – 2003. – №. 1. – С. 62-69.
17. Гордеев, Е. И. Толбачинское трещинное извержение 2012-2013 гг. (ТТИ-50) / Е. И. Гордеев, Н. Л. Добрецов, И. Ю. Кулаков, Я. Д. Муравьев, А. О. Вольнец, Е. В. Кукарина, И. Ф. Абкадыров, И. Р. Абубакиров, Л. П. Аникин, А. Н. Василевский, П. В. Воропаев, В. Т. Гарбузова, А. В. Горбатиков, Т. А. Горностаева, И. Г. Грибоедова, В. Н. Двигало, Ю. В. Демянчук, С. Я. Дрознина, Е. А. Зеленин, М. Е. Зеленский, Х. Ивамори, Е. И. Иванова, Г. А. Карпов, Т. Ю. Кожевникова, А. В. Котляров, Ю. А. Кугаенко, В. А. Логинов, К. М. Магуськин, М. А. Магуськин, Н. А. Малик, Д. В. Мельников, Ю. Ф. Мороз, А. В. Мохов, З. А. Назарова, А. М. Новгородова, А. М. Симонов, А. В. Яковлев // Изд-во СО РАН – Новосибирск. – 2017. – С. 421.
18. Гордеев, Е. И. Мелкофокусные землетрясения п-ва Камчатка / Е. И. Гордеев, А. А. Гусев, В. И. Левина, В. Л. Леонов, В. Н. Чебров // Вулканология и сейсмология. – 2006. – №. 3. – С. 28-38.
19. Добрецов, Н. Л. Петрологические, геохимические и геодинамические особенности субдукционного магматизма / Н. Л. Добрецов // Петрология. – 2010. – Т. 18. – №. 1. – С. 88-110.
20. Добрецов, Н. Л. Пути миграции магм и флюидов и составы вулканических пород Камчатки / Н. Л. Добрецов, И. Ю. Кулаков, Ю. Д. Литасов // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. – №. 12. – С. 1633-1661.
21. Дрознин, В. А. Тепловизионные исследования вулканов Камчатки в 2008-2009 гг / В. А. Дрознин, И. К. Дубровская // Материалы II научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». – 2009. – С. 11-17.

22. Дрознин, Д. В. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS / Д. В. Дрознин, С. Я. Дрознина // Сейсмические приборы. – 2010. – Т. 46. – №. 3. – С. 22-34.
23. Кирсанов, И. Т. Извержение вулкана Горелый в 1980 г. / И. Т. Кирсанов // Вулканология и сейсмология. – 1981. – №. 1. – С. 70-74.
24. Кирсанов, И. Т. Вулкан Горелый / И. Т. Кирсанов, И. В. Мелекесцев // Действующие вулканы Камчатки: в 2-х т. – М. – 1991. – Т. 2. – С. 292-315.
25. Колосов В. М. Создание Камчатской энергосистемы (1964 – 1993). / В. М. Колосов – Петропавловск-Камчатский. Камчатский печатный двор. – 1997.
26. Короновский, Н. В. Наука о Земле. Сейсмическая томография / Н. В. Короновский // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – Т. 6. – №. 11. – С. 63-68.
27. Кулаков И. Ю. Геодинамические процессы в коре и верхней мантии земли по результатам региональной и локальной сейсмотомографии: дис. на соискание ученой степени д. г.- м. н. : 25.00.03, 25.00.10 : защищена 28.05.07 / Кулаков Иван Юрьевич. – ИГМ СО РАН. – 2007.
28. Кулаков, И. Ю. Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии / И. Ю. Кулаков, Н. Л. Добрецов, Н. А. Бушенкова, А. В. Яковлев // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – №. 6. – С. 830-851.
29. Кулаков, И. Ю. Паровая машина вулкана Горелый / И. Ю. Кудаков, П. Ю. Кузнецов // Природа. – 2015. – №. 6. – С. 91.
30. Лаврентьев, М. М. О трёх линеаризованных обратных задачах для гиперболических уравнений / М. М. Лаврентьев, В. Г. Романов // Докл. АН СССР. – 1966. – 171. – №. 6. – С. 1279-1281.
31. Ландер, А. В. Тектоническая позиция и очаговые параметры Хаилинского (Корякского) землетрясения 8 марта 1991 г.: существует ли плита Берингия? / А. В. Ландер, Б. Г. Букчин, Д. В. Дрознин, А. В. Кирюшин // Вычислительная сейсмология. – Москва: Наука. – 1994. – №. 26. С. 103-122.

32. Леглер, В. А. Развитие камчатки в кайнозой с точки зрения теории тектоники литосферных плит (источники энергии тектонических процессов и динамика плит) / В. А. Леглер // Тектоника литосферных плит. – М.: Ин-т Океанологии АН СССР. – 1977. – С. 137-169.
33. Мелекесцев, И. В. Динамика активности вулканов Мутновский и Горелый в голоцене и вулканическая опасность для прилегающих районов (по данным тефрохронологических исследований) / И. В. Мелекесцев, О. А. Брайцева, В. В. Пономарева // Вулканология и сейсмология. – 1987. – №. 3. – С. 3-18.
34. Мороз, Ю. Ф. Глубинная геоэлектрическая модель вулкана Горелый на Камчатке / Ю. Ф. Мороз, А. П. Скрипников // Физика Земли. – 1995. – №. 7. – С. 82.
35. Назарова, Д. П. Исходное содержание H₂O и условия образования родоначальных магм вулкана горелый (южная камчатка) по данным микроэлементной термобарометрии / Д. П. Назарова, М. В. Портнягин, С. П. Крашенинников, Н. Л. Миронов, А. В. Соболев // Доклады Академии наук. – Федеральное государственное унитарное предприятие Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Наука, 2017. – Т. 472. – №. 3. – С. 311-314.
36. Новограбленов, П. Т. Извержение Горелого вулкана в 1928-1930 гг. / П. Т. Новограбленов // Изв. Гос. Рус. Геогр. Об-ва. – 1930. – Т. 62. – №. 4. – С. 459-461.
37. Оболенцева, И. Р. Двухточечные алгоритмы расчёта лучей в слоисто-анизотропных средах / И. Р. Оболенцева, В. Ю. Гречка // Геология и геофизика. – 1988. – №. 10. – С. 104-112.
38. Овсянников А. А. Состояние вулкана Горелый в июне 2010 г. / А. А. Овсянников // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. - 2010. - № 1. - Вып. 15. - С. 10.
39. Озеров, А. Ю. Химический состав, летучие компоненты и элементы примеси расплавов вулканического центра Горелый (Южная Камчатка) по данным

- изучения включений в минералах / А. Ю. Озеров, Н. Н. Кононкова // Геохимия. – 2012. – №. 6. – С. 576-606.
40. Первухин, М. А. О генетической классификации озерных ванн / М. А. Первухин // Землеведение. – 1937. – Т. 39. – С. 526-537.
41. Попов, А. А. Строение земной коры по сейсмическим данным / А. А. Попов, Г. И. Аносов, В. В. Аргентов, С. К. Биккенина, Е. К. Злобин, Г. С. Немченко, А. В. Петров / Ред. К. Ф. Сергеев, М. Л. Красный // Геолого-геофизический атлас Курило-Камчатской островной системы. – Л.: ВСЕГЕИ. – 1987. – с. 18.
42. Прытков, А. С. Современная геодинамика Курильской зоны субдукции / А. С. Прытков, Н. Ф. Василенко, Д. И. Фролов // Тихоокеанская геология. – 2017. – №. 1. – Т. 36. – С. 23-28.
43. Селянгин, О. Б. Строение и развитие Гореловского вулканического центра, Южная Камчатка / О. Б. Селянгин, В. В. Пономарева // Вулканология и сейсмология. – 1999. – №. 2. – С. 3-23.
44. Селянгин, О. Б. Строение, вещество и близповерхностные магматические очаги вулканов Мутновский и Горелый (Мутновский геотермальный район, Камчатка). II. Вулкан Мутновский / О. Б. Селянгин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – №. S31.
45. Соболевская, О. В. Сесмичность вулкана Горелый в 1984-2009 гг. / О. В. Соболевская // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Матер. региональн. конф. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН. – 2009. – С. 382-386.
46. Соловьев, А. В. Возраст барабской свиты по данным U/Pb (SHRIMP) датирования (Срединный хребет, Камчатка): геологические следствия / А. В. Соловьев, Д. К. Хоуриган, М. Т. Брэндон, Д. И. Гарвер, Е. С. Григоренко // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2004. – Т. 12. – №. 4. – С. 110-117.

47. Соловьев, А. В. Изучение тектонических процессов в областях конвергенции литосферных плит: методы трекового и структурного анализа / А. В. Соловьев // Москва: Наука. – 2008. – С. 319.
48. Тихоцкий, С. А. Строение вулкана Везувий по данным активной сейсмической томографии–новые результаты интерпретации данных, полученных в ходе проекта TOMOVES / С. А. Тихоцкий, У. Ахауер // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2011. – №. 1. – С. 34-44.
49. Токарев, П. И. Вулканические землетрясения Камчатки / П. И. Токарев // Москва: Наука. – 1981.
50. Федотов, С. А. Динамика роста и развития проточных магматических очагов Мутновско-Гореловской группы вулканов, их тепловые поля и накопленное ими подземное тепло / С. А. Федотов, И. Ф. Делемень, И. С. Уткин, Л. И. Уткина // Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма: Материалы Международного полевого Курило-Камчатского семинара, 16 июля - 6 августа 2005 г. – 2005. – С. 141-152.
51. Хаттон, Л. Обработка сейсмических данных: теория и практика / Л. Хаттон, М. Уэрдингтон, Дж. Мейкин // Москва: Мир. – 1989. – С. 216.
52. Хогоев, Е. А. Применение сейсмоэмиссионной томографии для изучения геодинамически активных зон / Е. А. Хогоев, Ю. И. Колесников // Seismic Technology. – 2011. – Т. 8. – №. 1. – С. 59-65.
53. Abramnikov, S. Seismic tremor associated with the degassing of the Gorely volcano in 2013-2014 / S. Abramnikov, N. Shapiro, I. Koulakov, I. Abkadyirov, W. Frank, A. Jakovlev // EGU General Assembly Conference Abstracts. – 2016. – Т. 18.
54. Aiuppa, A. First volatile inventory for Gorely volcano, Kamchatka / A. Aiuppa, G. Giudice, M. Liuzzo, G. Tamburello, P. Allard, S. Calabrese, I. Chaplygin, A. J. S. McGonigle, Y. Taran. // Geophysical Research Letters. – 2012. – Т. 39. – №. 6.
55. Aki, K. Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes: 1. A homogeneous initial

- model / K. Aki, W. H. K. Lee // *Journal of Geophysical Research*. – 1976. – T. 81. – №. 23. – C. 4381-4399.
56. Aloisi, M. Seismic tomography of the crust underneath the Etna volcano, Sicily / M. Aloisi, O. Cocina, G. Neri, B. Orecchio, E. Privitera // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 2002. – T. 134. – №. 3-4. – C. 139-155.
57. Alparone, S. Intrusive mechanism of the 2008-2009 Mt. Etna eruption: constraints by tomographic images and stress tensor analysis / S. Alparone, G. Barberi, O. Cocina, E. Giampiccolo, C. Musumeci, D. Patanè // *Journal of volcanology and geothermal research*. – 2012. – T. 229. – C. 50-63.
58. Anderson, D. L. Seismic tomography / D. L. Anderson, A. M. Dziewonski // *Scientific American*. – 1984. – T. 251. – №. 4. – C. 60-71.
59. Avdeiko, G. P. Evolution of the Kurile-Kamchatkan volcanic arcs and dynamics of the Kamchatka-Aleutian junction / G. P. Avdeiko, D. P. Savelyev, A. A. Palueva, S. V. Popruzhenko // *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*. – 2007. – T. 172. – C. 37.
60. Ben-Zvi, T. The P-wave velocity structure of Deception Island, Antarctica, from two-dimensional seismic tomography / T. Ben-Zvi, W. S. Wilcock, A. H. Barclay, D. Zandomenighi, J. M. Ibáñez, J. Almendros // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2009. – T. 180. – №. 1. – C. 67-80.
61. Bijwaard, H. Closing the gap between regional and global travel time tomography / H. Bijwaard, W. Spakman, E. R. Engdahl // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 1998. – T. 103. – №. B12. – C. 30055-30078.
62. Bluth, G. J. S. Explosive emissions of sulfur dioxide from the 1992 Crater Peak eruptions, Mount Spurr volcano, Alaska / G. J. S. Bluth, C. J. Scott, I. E. Sprod, C. C. Schnetzler, A. J. Krueger, L. S. Walter // *US Geol. Surv. Bull.* – 1995. – T. 2139. – C. 37-46.
63. Braitseva, O. A. Ages of calderas, large explosive craters and active volcanoes in the Kuril-Kamchatka region, Russia / O. A. Braitseva, I. V. Melekestsev, V. V.

- Ponomareva, L. D. Sulerzhitsky // *Bulletin of Volcanology*. – 1995. – T. 57. – №. 6. – C. 383-402.
64. Brenguier, F. 3-D surface wave tomography of the Piton de la Fournaise volcano using seismic noise correlations / F. Brenguier, N. M. Shapiro, M. Campillo, A. Nercessian, V. Ferrazzini // *Geophysical research letters*. – 2007. – T. 34. – №. 2.
65. Chatterjee, S. N. Vp/Vs ratios in the Yellowstone national park region, Wyoming / S. N. Chatterjee, A. M. Pitt, H. M. Iyer // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 1985. – T. 26. – №. 3-4. – C. 213–230.
66. Coombs, M. L. Geothermal disruption of summit glaciers at Mount Spurr Volcano, 2004–6: an unusual manifestation of volcanic unrest / M. L. Coombs, C. A. Neal, R. L. Wessels, R. G. McGimsey // *US Geol Surv Professional Paper*. – 2006.
67. De Siena, L. Seismic attenuation imaging of Campi Flegrei: Evidence of gas reservoirs, hydrothermal basins, and feeding systems / L. De Siena, E. Del Pezzo, F. Bianco // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2010. – T. 115. – №. B9.
68. Di Stefano, R. Active source tomography at Mt. Vesuvius: Constraints for the magmatic system / R. Di Stefano, C. Chiarabba // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2002. – T. 107. – №. B11.
69. Dines, K. A. Computerized geophysical tomography / K. A. Dines, R. J. Lytle // *Proceedings of the IEEE*. – 1979. – T. 67. – №. 7. – C. 1065–1073.
70. Dixon, J. P. Catalog of earthquake hypocenters at Alaskan volcanoes: January 1, 2000 through December 31, 2001 / J. P. Dixon, S. D. Stihler, J. A. Power, G. Tytgat, S. Estes, S.C. Moran, J. Paskievitch, S. R. McNutt // *US Geol. Surv. Open-File Rep*. – 2002. – C. 02–342.
71. Duggen, S. Drastic shift in lava geochemistry in the volcanic-front to rear-arc region of the Southern Kamchatkan subduction zone: Evidence for the transition from slab surface dehydration to sediment melting / S. Duggen, M. Portnyagin, J. Baker, D. Ulfbeck, K. Hoernle, D. Garbe-Schönberg, N. Grassineau // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2007. – T. 71. – №. 2. – C. 452–480.

72. Dziewonski, A. M. Preliminary reference Earth model / A. M. Dziewonski, D. L. Anderson // *Physics of the earth and planetary interiors*. – 1981. – T. 25. – №. 4. – C. 297–356.
73. Eberhart-Phillips, D. Three-dimensional velocity structure in northern California Coast Ranges from inversion of local earthquake arrival times / D. Eberhart-Phillips // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1986. – T. 76. – №. 4. – C. 1025-1052.
74. García-Yeguas, A. High resolution 3D P wave velocity structure beneath Tenerife Island (Canary Islands, Spain) based on tomographic inversion of active-source data / A. García-Yeguas, I. Koulakov, J. M. Ibáñez, A. Rietbrock // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2012. – T. 117. – №. B9.
75. Gasparini, P. Looking inside Mt. Vesuvius / P. Gasparini // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. – 1998. – T. 79. – №. 19. – C. 229-232.
76. Gavrilenko, M. Abrupt transition from fractional crystallization to magma mixing at Gorely volcano (Kamchatka) after caldera collapse / M. Gavrilenko, A. Ozerov, P. R. Kyle, M. J. Carr, A. Nikulin, C. Vidito, L. Danyushevsky // *Bulletin of Volcanology*. – 2016. – T. 78. – №. 7. – C. 47.
77. Gorbatov, A. Tomographic imaging of the P-wave velocity structure beneath the Kamchatka peninsula / A. Gorbatov, J. Dominguez, G. Suarez, V. Kostoglodov, D. Zhao, E. Gordeev // *Geophysical Journal International*. – 1999. – T. 137. – №. 2. – C. 269-279.
78. Gordon, R. A tutorial on PRT / R. Gordon // *I.E.E.E. Trans. Nucl. Sci.* – 1974. – №. S21. – C. 78-93.
79. Grand, S. P. Mantle shear-wave tomography and the fate of subducted slabs / S. P. Grand // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2002. – T. 360. – №. 1800. – C. 2475-2491.
80. Hansen, S. E. Investigating the P wave velocity structure beneath Harrat Lunayyir, northwestern Saudi Arabia, using double-difference tomography and earthquakes

- from the 2009 seismic swarm / S. E. Hansen, H. R. DeShon, M. M. Moore-Driskell, A. M. Al-Amri // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2013. – T. 118. – №. 9. – C. 4814-4826.
81. Herglotz, G. Über das Benndorfsche Problem der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erdbebenstrahlen / G. Herglotz // *Zeitschrift für Geophys.* – 1907. – T. 8. – C. 145-147.
82. Herman, G. T. Iterative reconstruction algorithms / G. T. Herman, A. Lent // *Computers in biology and medicine*. – 1976. – T. 6. – №. 4. – C. 273-294.
83. Ibáñez, J. M. Imaging an active volcano edifice at Tenerife Island, Spain / J. M. Ibáñez, A. Rietbock, A. García-Yeguas // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. – 2008. – T. 89. – №. 32. – C. 289-290.
84. Jakovlev, A. Temporary seismic networks on active volcanoes of Kamchatka (Russia) / A. Jakovlev, I. Koulakov, I., Abkadyrov, N. Shapiro, P. Kuznetsov, E. Deev, E. Gordeev, V. Chebrov // *10th Biennial workshop on Japan-Kamchatka-Alaska subduction processes (JKASP-2018) (Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, August 20-26, 2018): Abstracts*. – 2018. – C. 99-101.
85. Jaxybulatov, K. A large magmatic sill complex beneath the Toba caldera / K. Jaxybulatov, N. M. Shapiro, I. Koulakov, A. Mordret, M. Landès, C. Schönfelder // *Science*. – 2014. – T. 346. – №. 6209. – C. 617-619.
86. Juhle, W. The Mt. Spurr eruption, July 9, 1953 / W. Juhle, H. Coulter // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. – 1955. – T. 36. – №. 2. – C. 199-202.
87. Kasatkina, E. Seismic structure changes beneath Redoubt Volcano during the 2009 eruption inferred from local earthquake tomography / E. Kasatkina, I. Koulakov, M. West, P. Izbekov // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2014. – T. 119. – №. 6. – C. 4938-4954.
88. Kennet, B. L. N. IASPEI 1991 seismological tables / B. L. N. Kennet // *Terra Nova*. – 1991. – T. 3. – №. 2. – C. 122-122.

89. Kennett, B. L. N. Traveltimes for global earthquake location and phase identification / B. L. N. Kennett, E. R. Engdahl // *Geophysical Journal International*. – 1991. – T. 105. – №. 2. – C. 429-465.
90. Kennett, B. L. N. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes / B. L. N. Kennett, E. R. Engdahl, R. Buland // *Geophysical Journal International*. – 1995. – T. 122. – №. 1. – C. 108-124.
91. Koulakov, I. Moho depth and three-dimensional P and S structure of the crust and uppermost mantle in the Eastern Mediterranean and Middle East derived from tomographic inversion of local ISC data / I. Koulakov, S. V. Sobolev // *Geophysical Journal International*. – 2006. – T. 164. – №. 1. – C. 218-235.
92. Koulakov, I. Fluid ascent during the 2004-2005 unrest at Mt. Spurr inferred from seismic tomography / I. Koulakov, M. West, P. Izbekov // *Geophysical Journal International*. – 2006. – T. 164. – №. 1. – C. 218–235.
93. Koulakov, I. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion. Benchmarks for testing tomographic algorithms / I. Koulakov // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2009. – T. 99. – №. 1. – C. 194-214.
94. Koulakov, I. Feeding volcanoes of the Kluchevskoy group from the results of local earthquake tomography / I. Koulakov, E. I. Gordeev, N. L. Dobretsov, V. A. Vernikovskiy, S. Senyukov, A. Jakovlev // *Geophysical research letters*. – 2011. – T. 38. – №. 9.
95. Koulakov, I. Structure and dynamics of the volcano feeding systems from seismic tomography studies (overview) / I. Koulakov, A. Jakovlev, M. West, P. Kuznetsov, A. Ivanov, E. Kukarina // *EGU General Assembly Conference Abstracts*. – 2013. – T. 15.
96. Koulakov, I. Evidence of magma activation beneath the Harrat Lunayyir basaltic field (Saudi Arabia) from attenuation tomography / I. Koulakov, S. El Khrepy, N. Al-Arifi, I. Sychev, P. Kuznetsov // *Solid Earth*. – 2014a. – T. 5. – №. 2. – C. 873-882.

97. Koulakov, I. Asymmetric caldera-related structures in the area of the Avacha group of volcanoes in Kamchatka as revealed by ambient noise tomography and deep seismic sounding / I. Koulakov, K. Jaxybulatov, N. M. Shapiro, I. Abkadyrov, E. V. Deev, A. V. Jakovlev, P. Kuznetsov, E. I. Gordeev, V. N. Chebrov // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2014b. – T. 285. – C. 36-46.
98. Koulakov, I. Seismic velocity and attenuation tomography models beneath the Lunayyir basaltic field (Saudi Arabia) reveal the activation of magma sources / I. Koulakov, S. El Khrepy, N. Al-Arifi, I. Sychev, P. Kuznetsov, E. Kasatkina // *EGU General Assembly Conference Abstracts*. – 2014c. – T. 16.
99. Koulakov, I. Structural cause of a missed eruption in the Harrat Lunayyir basaltic field (Saudi Arabia) in 2009 / I. Koulakov, S. El Khrepy, N. Al-Arifi, P. Kuznetsov, E. Kasatkina // *Geology*. – 2015a. – T. 43. – №. 5. – C. 395-398.
100. Koulakov, I. Evidences for high gas content beneath the Gorely volcano in Kamchatka (Russia) based on very low V_p/V_s ratio revealed from local earthquake tomography / I. Koulakov, P. Kuznetsov, E. Gordeev, V. Chebrov // *EGU General Assembly Conference Abstracts*. – 2015b. – T. 17.
101. Koulakov, I. Anisotropic tomography of Hokkaido reveals delamination-induced flow above a subducting slab / I. Koulakov, E. Kukarina, I. H. Fathi, S. El Khrepy, N. Al-Arifi // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2015c. – T. 120. – №. 5. – C. 3219-3239.
102. Koulakov, I. Three different types of plumbing system beneath the neighboring active volcanoes of Tolbachik, Bezymianny, and Klyuchevskoy in Kamchatka / I. Koulakov, I. Abkadyrov, N. Al-Arifi, E. Deev, S. Droznina, E. I. Gordeev, A. Jakovlev, S. El Khrepy, R. I. Kulakov, Y. Kugaenko, A. Novgorodova, S. Senyukov, N. Shapiro, T. Stupina, M. West // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2017. – T. 122. – №. 5. – C. 3852-3874.
103. Koulakov, I. Evolution of the magma conduit beneath the Galeras volcano inferred from repeated seismic tomography / I. Koulakov, C. A. Vargas // *Geophysical Research Letters*. – 2018. – T. 45. – №. 15. – C. 7514-7522.

104. Kukarina, E. Focused magmatism beneath Uturuncu volcano, Bolivia: Insights from seismic tomography and deformation modeling / E. Kukarina, M. West, L. H. Keyson, I. Koulakov, L. Tsibizov, S. Smirnov // *Geosphere*. – 2017. – T. 13. – №. 6. – C. 1855-1866.
105. Kuznetsov, P. Y. The three-dimensional structure beneath the Popocatepetl volcano (Mexico) based on local earthquake seismic tomography / P. Y. Kuznetsov, I. Y. Koulakov // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2014. – T. 276. – C. 10-21.
106. Kuznetsov, P., Koulakov, I. Seismic structures beneath Popocatepetl (Mexico) and Gorely (Kamchatka) volcanoes derived from passive tomography studies / P. Kuznetsov, I. Koulakov // *EGU General Assembly Conference Abstracts*. – 2014. – T. 16.
107. Kuznetsov, P. Structure of volatile conduits beneath Gorely volcano (Kamchatka) revealed by local earthquake tomography / P. Kuznetsov, I. Koulakov, A. Jakovlev, I. Abkadyrov, E. Deev, E. Gordeev, S. Senyukov, S. El Khrepy, N. Al Arifi // *Geosciences*. – 2017. – T. 7. – №. 4. – C. 111.
108. Lobkis, O. I. On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field / O. I. Lobkis, R. L. Weaver // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 2001. – T. 110. – №. 6. – C. 3011-3017.
109. Luehr, B. G. TOMO-ETNA Experiment-Etna volcano, Sicily, investigated with active and passive seismic methods / B. G. Luehr, J. M. Ibanez, A. Díaz-Moreno, J. Prudencio, D. Patane, T. Zieger, O. Cocina, L. Zuccarello, I. Koulakov, D. Roessler, T. Dahm // *EGU General Assembly Conference Abstracts*. – 2017. – T. 19. – C. 9088.
110. Mackey, K. G. Seismicity of the Bering Strait region: evidence for a Bering block / K. G. Mackey, K. Fujita, L. V. Gunbina, V. N. Kovalev, V. S. Imaev, B. M. Koz'min, L. P. Imaeva // *Geology*. – 1997. – T. 25. – №. 11. – C. 979-982.

111. Mersereau, R. M. Digital reconstruction of multi-dimensional signals from their projections / R. M. Mersereau, A. V. Oppenheim // *Proceedings of the IEEE*. – 1974. – T. 62. – №. 10. – C. 1319-1338.
112. Morelli, A. Body-wave traveltimes and a spherically symmetric P- and S-wave velocity model / A. Morelli, A. M. Dziewonski // *Geophysical Journal International*. – 1993. – T. 112. – №. 2. – C. 178-194.
113. Nakajima, J. Tomographic imaging of seismic velocity structure in and around the Onikobe volcanic area, northeastern Japan: implications for fluid distribution / J. Nakajima, A. Hasegawa // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2003. – T. 127. – №. 1-2. – C. 1-18.
114. Naranjo, J. L. Eruption of the Nevado del Ruiz volcano, Colombia, on 13 November 1985: tephra fall and lahars / J. L. Naranjo, H. Sigurdsson S. N. Carey, W. Fritz // *Science*. – 1986. – T. 233. – №. 4767. – C. 961-963.
115. Nikolaev, A. V. Lithospheric studies based on array analysis of P-coda and microseisms / A. V. Nikolaev, P. A. Troitskiy // *Tectonophysics*. – 1987. – T. 140. – №. 1. – C. 103-113.
116. Nolet, G. Linearized inversion of (teleseismic) data. / G. Nolet // *The solution of the inverse problem in geophysical interpretation*. – Springer, Boston, MA, 1981. – C. 9-37.
117. Nolet, G. Seismic wave propagation and seismic tomography / G. Nolet // *Seismic tomography*. – Springer, Dordrecht, 1987. – C. 1-23.
118. Nye C. J. Petrology, geochemistry, and age of the Spurr volcanic complex, eastern Aleutian arc / C. J. Nye, D. L. Turner // *Bulletin of Volcanology*. – 1990. – T. 52. – №. 3. – C. 205-226.
119. Paige, C. C. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares / C. C. Paige, M. A. Saunders // *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*. – 1982. – T. 8. – №. 1. – C. 43-71.

120. Patanè, D. Time- resolved seismic tomography detects magma intrusions at Mount Etna / D. Patanè, G. Barberi, O. Cocina, P. De Gori, C. Chiarabba // *Science*. – 2006. – T. 313. – №. 5788. – C. 821-823.
121. Pavez, C. Characterization of the hydrothermal system of the Tinguiririca Volcanic Complex, Central Chile, using structural geology and passive seismic tomography / C. Pavez, F. Tapia, D. Comte, F. Gutierrez, E. Lira, R. Charrier, O. Benavente // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2016. – T. 310. – C. 107-117.
122. Pederson, J. E. Application of algebraic reconstruction techniques to crosshole seismic data / J. E. Pederson, B. N. Paulson, T. V. McEvelly // *Geophysics*. – 1985. – T. 50. – №. 10. – C. 1566-1580.
123. Peryra, V. Solving two-point seismic-ray tracing problems in heterogeneous medium / V. Peryra, W. H. K. Lee, H. B. Keller // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1980. – T. 70. – №. 1. – C. 79-99.
124. Scaillet B. Experimental constraints on volatile abundances in arc magmas and their implications for degassing processes / B. Scaillet, M. Pichavant // *Geological Society, London, Special Publications*. – 2003. – T. 213. – №. 1. – C. 23-52.
125. Servicio Geologico Colombiano. Informe Técnico Anual de la actividad volcánica del segmento volcánico norte de Colombia. – 2016. – <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Informes%20tcnicos/Informe%20t%C3%A9cnico%20anual%20de%202015.pdf>
126. Sethian, J. A. Three dimensional traveltimes computation using the fast marching method / J. A. Sethian, M. Popovich // *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1997*. – Society of Exploration Geophysicists, 1997. – C. 1778-1781.
127. Shearer, P. M. Constrains on Upper Mantle Discontinuities From Observation of Long-Period Reflected and Converted Phases / P. M. Shearer // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 1991. – T. 96. – №. B11. – C. 18147-18182.
128. Siebert L. *Volcanoes of the World* / L. Siebert, T. Simkin P. Kimberly – Univ of California Press, 2011.

129. Stix, J. Mechanisms of degassing at Nevado del Ruiz volcano, Colombia / J. Stix, G. D. Layne, S. N. Williams // *Journal of the Geological Society*. – 2003. – T. 160. – №. 4. – C. 507-521.
130. Sun, Y. Ray tracing in 3-D media by parameyerized shooting / Y. Sun // *Geophysical Journal International*. – 1993. – T. 114. – №. 1. – C. 145-155.
131. Takei, Y. Effect of pore geometry on VP /VS: From equilibrium geometry to crack / Y. Takei // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2002. – T. 107. – №. B2. – C. ECV 6-1-ECV 6-12.
132. Tchebotareva, I. I. Seismic emission activity of Earth's crust in Northern Kanto, Japan / I. I. Tchebotareva, A. V. Nikolaev, H. Sato // *Physics of the Earth and planetary interiors*. – 2000. – T. 120. – №. 3. – C. 167-182.
133. Thurber, C. H. Earthquake locations and three-dimensional crustal structure in the Coyote Lake area, central California / C. H. Thurber // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 1983. – T. 88. – №. B10. – C. 8226-8236.
134. Trier, J. Upwind finite-difference calculation of traveltimes / J. Trier, W. W. Symes // *Geophysics*. – 1991. – T. 56. – №. 6. – C. 812-821.
135. Um, J. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing / J. Um, C. Thurber // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1987. – T. 77. – №. 3. – C. 972-986.
136. Van Der Sluis, A. Numerical solution of large, sparse linear algebraic systems arising from tomographic problems / A. Van Der Sluis, H. A. Van der Vorst // *Seismic tomography*. – Springer, Dordrecht, 1987. – C. 49-83.
137. Vargas, C. A. Breathing of the Nevado del Ruiz volcano reservoir, Colombia, inferred from repeated seismic tomography / C. A. Vargas, I. Koulakov, C. Jaupart, V. Gladkov, E. Gomez, S. El Khrepy, N. Al-Arifi // *Scientific Reports*. – 2017. – T. 7. – C. 46094.
138. Vargas, C. A. Three-dimensional velocity structure of the Galeras volcano (Colombia) from passive local earthquake tomography / C. A. Vargas, R. Torres // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2015. – T. 301. – C. 148-158.

139. Wiechert, E. Über Erdbebenwellen / E. Wiechert // Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse. – 1907. – T. 1907. – C. 415-549.
140. Zandomeneghi, D. Internal structure of Erebus volcano, Antarctica imaged by high-resolution active-source seismic tomography and coda interferometry / D. Zandomeneghi, R. Aster, P. Kyle, A. Barclay, J. Chaput, H. Knox // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2013. – T. 118. – №. 3. – C. 1067-1078.
141. Zandomeneghi, D. Crustal structure of Deception Island volcano from P wave seismic tomography: Tectonic and volcanic implications / D. Zandomeneghi, A. Barclay, J. Almendros, J. M. Ibañez Godoy, W. S. Wilcock, T. Ben-Zvi // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2009. – T. 114. – №. B6.
142. Zhao, D. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep Earth dynamics / D. Zhao // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2004. – T. 146. – №. 1-2. – C. 3-34.
143. Zollo, A. A 2-D non linear method for travelttime tomography: Application to Mt Vesuvius active seismic data / A. Zollo, R. De Matteis, L. U. C. A. D'Auria, J. E. A. N. Virieux // Problems in Geophysics for the next millenium. – 2000. – C. 125-140.