

На правах рукописи



КУЗНЕЦОВ Павел Юрьевич

**ИЗУЧЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ВУЛКАНА ГОРЕЛЫЙ
(КАМЧАТКА) МЕТОДОМ ПАССИВНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ
ТОМОГРАФИИ**

1.6.9 – геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата геолого-минералогических наук

НОВОСИБИРСК – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).

Научный руководитель:

Кулаков Иван Юрьевич, доктор геолого-минералогических наук, чл.-корр. РАН, профессор РАН.

Официальные оппоненты:

Собисевич Алексей Леонидович, доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН, ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН заведующий лабораторией (г. Москва);

Шебалин Петр Николаевич, доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН, ФГБУН Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, директор (г. Москва).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН) (г. Обнинск).

Защита состоится 10 февраля 2022 г. в 15 час. на заседании диссертационного совета 24.1.087.02 (Д 003.068.03), созданного на базе ИНГГ СО РАН, в конференц-зале, по адресу: г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

Отзыв в двух экземплярах, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России (см. вклейку), просим направлять по адресу:

просп. Ак. Коптюга, 3 г. Новосибирск, 630090;

факс: (383) 330-28-07

e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru;

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/theses/d003-068-03/kuznetsov20212>

Автореферат разослан 10 декабря 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.087.02 (Д 003.068.03),
д.г.-м.н., доцент



Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

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.

Объектом исследования является активный вулкан Горелый на полуострове Камчатка.

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 сейсмостанций 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_а 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.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, поставлены научные задачи, представлены основные этапы исследования и публикации по теме исследования, описаны научная новизна, личный вклад, теоретическая и практическая значимость, указан объем и структура диссертации.

Глава 1

В **первой главе**, являющейся литературным обзором, описывается история развития сейсмической томографии и области ее применения. Рассматриваются различные методы сейсмотомографии, используемые для изучения вулканов, такие как томография с активными источниками, пассивная сейсмическая томография, эмиссионная томография, томография с использованием сейсмического шума.

Проводится анализ работ с использованием методов сейсмической томографии по активным вулканам схожим по ряду свойств с изучаемым объектом. Вулкан Горелый характеризуется высоким уровнем дегазации и большой сейсмоактивностью под ним. К вулканам такого же типа относится самый высокий действующий вулкан Аляски, вулкан Спурр. В момент повышения фумарольной активности в 2015 году на нем была установлена временная сейсмическая сеть, с помощью которой удалось зарегистрировать 512 землетрясений в коре [Dixon et al., 2006], что позволило применить метод пассивной сейсмической томографии [Koulakov et al., 2013]. В обзоре также представлены результаты повторной томографии для вулкана Невадо-дель-Руис в Колумбии, который является одним из опаснейших вулканов на планете с высоким газовыделением в периоды максимальной активности [Vargas et al., 2017]. Также упомянуты работы по таким объектам как вулкан Галерас в Колумбии [Vargas and Torres, 2015], Флегрейские Поля в Италии [De Siena et al., 2010] и Йеллоустонский национальный парк [Chatterjee et al., 1985].

В Главе 1 также приводится геологическое описание и история образования региона исследования - полуострова Камчатка. Вулканы на полуострове приурочены к Курило-Камчатской вулканической дуге, которая образовалась в результате субдукции Тихоокеанской океанической плиты под

Охотскую континентальную плиту. Представлен анализ работ по изучению зоны субдукции методами сейсмической томографии [Bijwaard et al., 1998; Grand, 2002; Zhao, 2004; Koulakov et al., 2011].

В данной главе детально рассматривается геология вулкана Горелый [Селянгин и Пономарева, 1999] и анализируются имеющиеся работы по его изучению. Отмечается, что за последние несколько десятков тысяч лет вулкан Горелый проходил несколько этапов эруптивной активности различного типа [Новограбленов, 1930; Кирсанов, 1981; Будников, 1988]. На момент установки сейсмической сети в 2013-2014 годах, на вулкане наблюдался активный выброс газов и повышенная сейсмоактивность под ним. В обзоре представлены работы по изучению вулкана Горелый другими геолого-геофизическими методами, помимо сейсмологических подходов, такие как магнитотеллурическое зондирование для получения геоэлектрической модели [Мороз и Скрипников, 1995] и инфракрасный анализ газовыбросов [Дрознин и Дубровская, 2009].

В заключении первой главы отмечается, что вулкан Горелый является интересным и актуальным объектом исследования, что связано с его непосредственной близостью к населенным пунктам, высокой сейсмоактивностью под ним и отсутствием работ по изучению его внутренней структуры какими-либо сейсмологическими методами.

Глава 2

Во **второй** главе представлены методика исследования и экспериментальная часть работы.

В главе идет ознакомление с характеристиками используемого сейсмологического оборудования и параметрами временной сети станций. Каждая станция представляла из себя комплект оборудования, состоящего из трехкомпонентного регистратора – Ваукал АСN-87/88, молекулярно-электронного сейсмоприемника – СМЕ-4111-LT и десяти марганцево-воздушно-цинковых щелочных батарей Бакен ВЦ-1. Элементы питания, обладающие высокой емкостью, позволили установить данное оборудование в автономном режиме на длительный срок. В частности, 5 станций из 21 отработали 11 месяцев. Станции были установлены на вулкане Горелый по его постройке и в кальдере с интервалами 2-3 километра между станциями, образуя относительно плотную и равномерную сеть, достаточную для изучения внутренней структуры вулкана методом сейсмической томографии. Установка оборудования была произведена в конце августа 2013 года, а снятие в начале августа 2014 года.

Глава содержит описание программы DIMAS для обработки волновых форм, которая была предоставлена Камчатским филиалом Единой геофизической службы РАН [Дрознин и Дрознина, 2010]. Данный

программный продукт уже долгое время успешно используется для обработки сейсмологических записей с активных вулканов Камчатки. Описаны основные этапы работы в программе DIMAS, включающие процедуру подготовки волновых форм, процесс поиска событий и снятие времен первых вступлений прямых P и S-волн.

Также в главе описана программа LOTOS, ее области использования и основные этапы реализации расчетов. Алгоритм локальной сейсмической томографии LOTOS [Koulakov, 2009] предназначен для восстановления трехмерных распределений скоростей P- и S-волн и координат источников на базе использования времен прихода сейсмических волн от локальных землетрясений. Подробно рассмотрены основные этапы реализации программы: локализация источников в одномерной модели; локализация источников в 3D модели; построение параметризационной сетки; расчет матрицы первых производных; матричная инверсия. Результатами обработки данных являются трехмерные распределения скоростей P и S-волн, и координаты локальных источников. Программный продукт LOTOS позволяет реализовывать различные синтетические тесты. Они дают возможность проверить разрешающую способность рассчитанной модели и найти оптимальные значения параметров инверсии.

В заключении к главе отмечается, что автор имеет все необходимые данные и инструменты для выполнения поставленных задач, что дает возможность проводить полноценное и качественное исследование вулкана Горелый.

Глава 3

В **третьей главе** представлены полученные результаты исследования и их геологическая интерпретация.

Первым основным результатом работы является распределение гипоцентров локальных землетрясений под вулканом Горелый (Рисунок 1).

Было выделено 360 землетрясений, произошедших в период с сентября 2013 по февраль 2014 года. Стоит отметить, что гипоцентры событий, в основном, сконцентрированы непосредственно под главной постройкой вулкана Горелый, и только единичные землетрясения выходят за границы кальдеры, в которой находится вулкан. Также, в ходе анализа волновых форм отмечается, что под вулканом наблюдаются практически все типы землетрясений, соответствующие классификации вулканических землетрясений на Камчатке [Гарбузова и Соболевская, 2010], но наиболее распространены события II-III типа.

Вторым основным результатом являются скоростные модели среды под вулканом Горелый, полученные в ходе обработки сейсмических данных методом локальной сейсмической томографии в программе LOTOS. В главе

подробно расписаны этапы обработки и рассмотрены различные параметры настройки программы. Большое внимание было уделено определению оптимальной стартовой одномерной скоростной модели с помощью метода сеточного поиска, в ходе которого было получено, что минимальные невязки между истинными и модельными временами вступления волн достигаются при низком значении отношения V_p/V_s , примерно равному 1,5.

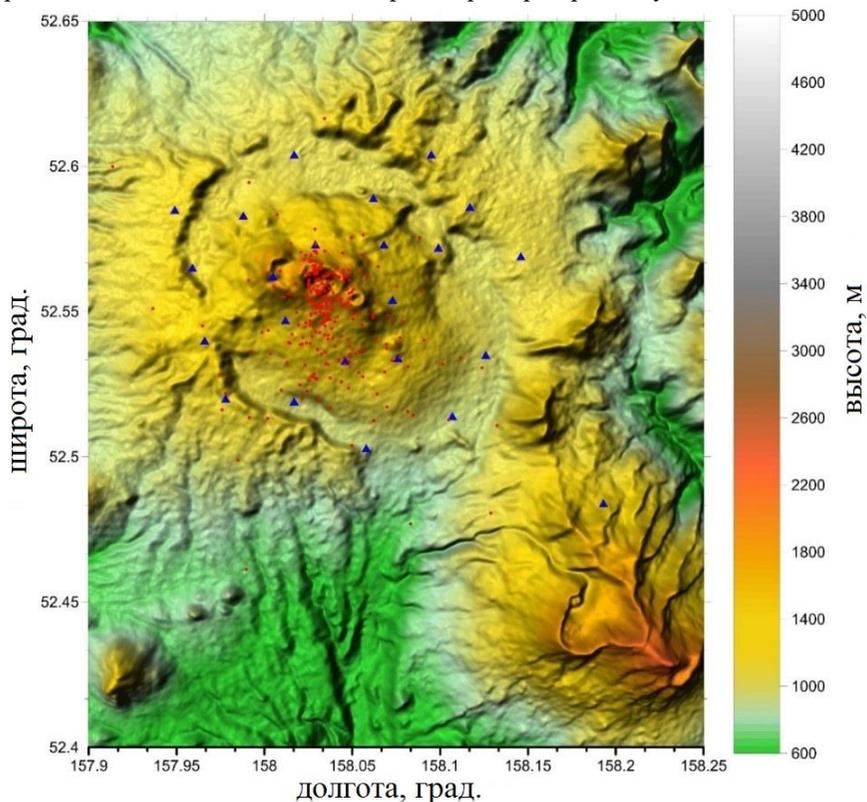


Рисунок 1 – Эпицентры найденных землетрясений на вулкане Горелый за период с сентября 2013 и февраль 2014. Синие треугольники – станции, красные точки – эпицентры землетрясений

В результате томографической инверсии были получены трехмерные распределения скоростей P и S-волн, и отношения V_p/V_s под вулканом Горелый до глубины 6 километров. Анализ моделей показал, что под вулканом наблюдаются значительные вариации значений отношения V_p/V_s ,

которые варьируется от 1.4 до 2 (Рисунок 2).

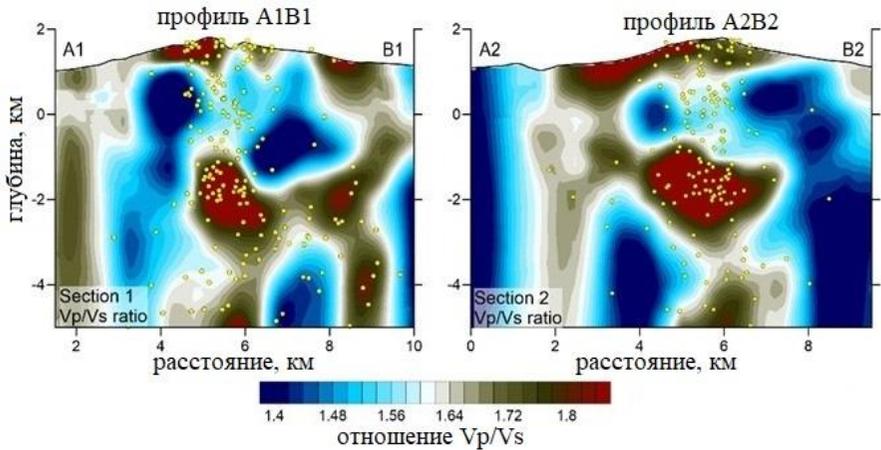


Рисунок 2 – Распределение отношения V_p/V_s на двух вертикальных сечениях до глубины 5 км. Желтые точки – проекции локализованных землетрясений на плоскость профиля

В главе также представлены результаты синтетического моделирования, которые позволяют оценить разрешающую способность полученной сейсмической модели и подобрать оптимальные коэффициенты регуляризации и сглаживания. Входные параметры программы LOTOS, конфигурация источников и приемников были такими же, что и при инверсии реальных данных. Проверка горизонтальной и вертикальной разрешающей способности была проведена с помощью теста «шахматная доска». Тесты с горизонтальными аномалиями показали, что томографическая инверсия позволяет корректно восстанавливать аномалии размером 1×1 км и крупнее. Тесты с вертикально расположенной «шахматной доской» показали, что в результатах восстановления аномалий наблюдается некоторое диагональное размытие, связанное с неоднозначностью при определении параметров источников и скорости. Однако, этот тест показывает, что положение аномалий можно корректно определить примерно до глубины 5 километров ниже уровня моря (Рис. 3).

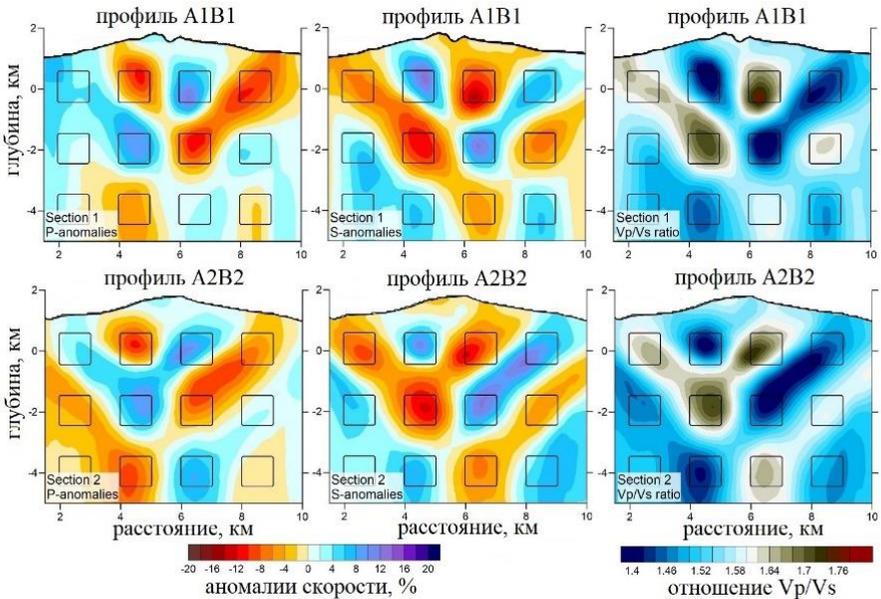


Рисунок 3 – Синтетический тест с «шахматной доской» для вертикального сечения по двум профилям, проходящим через вершину вулкана. Верхний ряд – первый профиль, нижний ряд – второй профиль. Черными контурами показаны положения синтетических аномалий

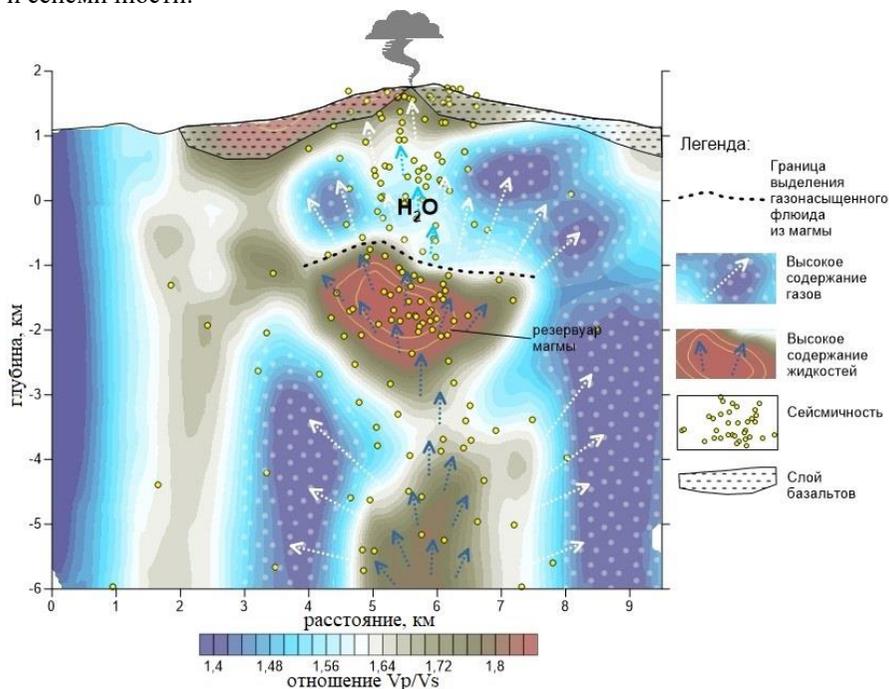
Третьим основным результатом является выделение под вулканом Горелый аномалии с высоким значением V_p/V_s (Рис. 4), которая расположена на глубине 1.5-2 километра ниже уровня моря. Эта аномалия характеризуется повышенной скоростью P-волн и пониженной скоростью S-волн, в результате чего значения отношения V_p/V_s достигает 2. Отмечается, что такого рода аномалии являются достаточно типичными для активных вулканов и соответствуют магматическим очагам, насыщенным расплавом и флюидами.

Обратная картина наблюдается в зонах, окружающих магматический резервуар, в которых отношение V_p/V_s , достигает низких значений – (до 1.4), что может быть объяснено наличием газа в порах/трещинах пород. Наличие большого количества газа под вулканом Горелый подтверждается высоким уровнем дегазации, наблюдавшемся во время работы сети [Aiuppa et al., 2012; Gavrilenko et al., 2016].

Не менее интересным результатом является выявленная граница на глубине 1-1,5 километра ниже уровня моря, где значение отношения V_p/V_s резко меняется с 2 до 1.4. Предполагается, что на этой глубине происходит

выделение газонасыщенного флюида из магмы, что, в свою очередь, вызывает сейсмичность в этой зоне.

В данной главе проводится аналогия с вулканом Спурр на Аляске, который был изучен методом сейсмической томографии [Koulakov et al., 2013]. В период изучения на этом вулкане наблюдался схожий по интенсивности выброс газов. Томографические модели по вулканам Спурр и Горелый показывают схожие особенности в распределении отношения V_p/V_s и сейсмичности.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено изучение геологической структуры вулкана Горелый используя метод пассивной сейсмической томографии.

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 Р- и S-волн, с данных за полгода наблюдений. На основании этих данных была построена скоростная модель, включающая трехмерные распределения скоростей Р 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 под вулканом выделяется магматический очаг, который окружен газонасыщенными породами. Также наблюдается граница, где происходит выделение газонасыщенного флюида из магмы.

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 статей, опубликованных по теме диссертации в журналах, рекомендованных ВАК:

1. **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)
2. Кулаков, И. Ю. Паровая машина вулкана Горелый / И. Ю. Кудakov, **П. Ю. Кузнецов** // *Природа*. – 2015. – №. 6. – С. 91.
3. **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)
4. 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)

Список основных докладов и тезисов:

1. 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 // Geophysical Research Abstracts. European Geosciences Union General Assembly 2015 (Vienna, Austria, 12-17 April 2015). – 2015. – Т. 17. – С. 5370-5370.

2. 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.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано в печать 21.10.2021

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 0,9. Тираж 115. Зак. № 196

ИНГТ СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3