

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук П.С. Мартышко на диссертацию Волковой Марии Сергеевны «ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ СМЕЩЕНИЙ НА СКЛОНАХ ВУЛКАНОВ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

В настоящее время данные, полученные с использованием искусственных спутников Земли, широко используются для изучения природных и техногенных процессов, в том числе, при исследовании сейсмических и вулканических процессов.

На Камчатке работы по изучению и мониторингу вулканических процессов проводят Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН и Камчатский филиал Единой геофизической службы РАН. Данные сети сейсмических станций и постоянных пунктов Глобальных Навигационных Спутниковых Систем, мониторинг активных вулканов по оптическим спутниковым снимкам позволяют изучать строение вулканов и прогнозировать готовящиеся извержения. Однако в труднодоступных районах наблюдательные сети не достаточно плотные. Поэтому необходимо использовать современные спутниковые методы исследования, такие как съёмка с применением **радаров с синтезированной апертурой (РСА интерферометрия)**. Этим определяется актуальность задач, рассмотренных в представленной работе: совершенствование технологии обработки радарных снимков для территории Камчатки, тестирование технологии с применением снимков различной длины волны, разработка методов интерпретации, предназначенных для изучения вулканических и сейсмических процессов.

Цель исследований, результаты которых изложены в рецензируемой работе, – совершенствование технологии обработки РСА снимков, адаптированной к условиям полуострова Камчатка, разработка новых численных моделей вулканических процессов и интерпретация получаемых полей смещений земной поверхности в рамках этих моделей (изучение природы и характера развития вулканических процессов). Построение численных математических моделей исследуемых геодинамических

процессов является **актуальной научной проблемой**, решение которой имеет важное практическое значение.

В рамках реализации поставленной цели диссертантом получены следующие **новые научные результаты**.

- 1. Разработана и обоснована путем массового тестирования на снимках C и L диапазона технология обработки РСА снимков, адаптированная к условиям полуострова Камчатка.** Для обработки спутниковых радарных снимков использовался L-диапазон (спутник ALOS-1/2). Отмечено, что имеются ограничения к применению снимков ALOS: у длинноволнового диапазона хуже радиометрическое разрешение и большой интервал съёмки территории Камчатки (1-2 раза в год); снимки в этом диапазоне подходят для применения метода парных интерферограмм. Для исследования динамики смещений во времени используются радарные изображения C-диапазона спутника Sentinel-1. Разработанная технология применения РСА-интерферометрии позволила определить сценарий обработки снимков: диапазон параметров и методов для применения на территории полуострова Камчатка. Были рассмотрены события вулканической и сейсмической активности, происходившие на полуострове Камчатка с 2006 года (год запуска ALOS-1) по 2021г. За этот период удалось получить поля смещений и временные ряды смещений на вулканах Плоский Толбачик, Корякский и Шивелуч. По РСА снимкам спутника Sentinel-1 за 2019 год впервые определены скорости оседания поверхности лавового потока, сформированного в результате извержения вулкана Плоский Толбачик в 2012–2013 гг. По результатам интерпретации, полученным методом малых базовых линий, определена область с максимальной скоростью оседания поверхности лавового слоя в районе конуса Клешня и субвертикальные скорости оседания (до 285 мм/год в 2017 года, 249 мм/год в 2018 года и 261 мм/год в 2019 года). Скорость оседания поверхности в центральных и нижних частях лавовых потоков не превышает 80 мм/год. Показано, что Ленинградское поле оседает немного быстрее, чем Толудское.
- 2. Для интерпретации поля смещений построена новая математическая модель остывания лавового потока, учитывающая скорость формирования толщины лавового слоя и (определенные по составу лав вулкана Плоский Толбачик) скрытую теплоту кристаллизации, зависимости теплоёмкости, теплопроводности и плотности от температуры, температурную зависимость концентрации кристаллов в объёме расплава и процент незакристаллизованного материала (стекло или расплав), пористость.** Показано, что более чем на 90% поверхности лавового поля зависимость оседания от толщины лавы хорошо объясняется

моделью, основанной на термическом охлаждении и уплотнении отложений лавы. Наилучшее соответствие данным РСА интерферометрии было достигнуто для процесса медленного формирования слоя лавы (приращение мощности слоя в 6 м в течение 20 дней), с пористостью 10-30% и содержанием стекла 30-50%. Области аномально быстрого оседания располагаются в окрестности прорыва Набоко, где во время извержения движение расплава происходило по лавовым трубам, уровень магмы в которых быстро понижался. Здесь скорости оседания лучше объясняются быстрым формированием лавового потока (6 м за 2 дня).

3. По снимкам спутника ALOS-1, работающего в длинноволновом L диапазоне, впервые определены смещения поверхности вулкана Корякский в результате извержения 2008–2009 гг. Показано, что смещения в направлении на спутник («поднятия») превосходят 25 см и не могут быть объяснены слоем пепловых отложений (т.к. склоновые процессы и таяние ледника должны были привести к смещениям противоположного знака). Обосновано, что наиболее вероятная причина смещений - внедрение магматического материала в постройку вулкана. Это подтверждается информацией о повышенной в рассматриваемый период сейсмической активности и данными тепловизионных исследований парогазовых выбросов. Интерпретация данных о смещениях поверхности вулкана Корякский выполнена в рамках модели внедрения дайки в вулканическую постройку, основанной на решении Окада, которое было модифицировано для учёта горного рельефа. В результате решения обратной задачи показано, что модель дайки с глубиной нижней кромки 0.5 км над уровнем моря, шириной по простиранию 1.0 км, по падению 2.4 км, с углом падения от 45 до 60 градусов хорошо соответствует смещениям, определенным по РСА интерферометрии; расчетный объем дайки согласуется с оценками других авторов [Кирюхин и др., 2017], [Гордеев, Дрознин, 2010]. Все результаты соответствуют объёму магмы, по порядку величины равной 10^6 м³, и подтверждают гипотезу о том, что извержения Корякского вулкана 2008–2009 гг. сопровождалось внедрением магмы в вулканическую постройку.

4. По снимкам спутника Sentinel-1A впервые определена скорость оседаний слоя пирокластических отложений на вулкане Шивелуч, сформировавшихся во время извержения 29 августа 2019 года: в 2020 году субвертикальная скорость оседаний достигала 385 мм/год, в 2021 году – 257 мм/год; мощность пирокластических отложений достигает 30 м.

Для исследования процесса оседания пирокластического потока построена термомеханическая модель остывания потока, в которой учтено уплотнение отложений за счёт изменения во времени их пористости и плотности. При

сопоставлении расчетных и реальных данных установлено, что термическая компонента оседаний полностью не объясняет наблюдаемых скоростей оседаний. Показано, что для объяснения зависимости скорости оседаний поверхности потока от мощности пород, достаточно предположить небольшое изменение пористости с 2019 по 2021 гг., которое в зависимости от начальной температуры потока составляет от 1.5 до 1.7%. Разброс зависимости скорость оседаний – мощность потока объясняется процессами размыва пирокластических отложений. Следы многочисленных потоков хорошо видны на амплитудной компоненте радарных спутниковых снимков; их положение согласуется с картой мощности потока, построенной по данным спутниковой РСА интерферометрии.

Структурно диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем работы - 97 страниц текста, 21 рисунок, 3 таблицы. Библиографический список содержит 94 наименований. Оформление работы соответствует предъявляемым требованиям, все исследования и результаты достаточно подробно и понятно изложены.

Замечания.

1. В работе ничего не говорится о точности оценки смещений по временным рядам в сравнении с точностью аппроксимации реальных данных моделью.
2. В предложенной математической модели оседание убывает по экспоненте, а в расчётах по интерферометрии временные ряды аппроксимируются линейной функцией. Это требует дополнительных объяснений.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки проведенных исследований.

Считаю, что представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой **содержится решение важной задачи, имеющей значение для изучения природы и характера развития вулканических процессов:** разработана новая численная модель вулканических процессов и методы интерпретации получаемых полей смещений земной поверхности (данных спутниковой радарной интерферометрии) в рамках этой модели.

Разработанные соискателем алгоритмы и программы всесторонне протестированы с использованием известных аналитических и численных решений, опробованы на практических данных, проведено сравнение с результатами других авторов. Корректное использование аппарата математической физики и вычислительной математики и апробация на практических данных позволяют сделать вывод о высокой степени обоснованности и достоверности проведенных исследований. Все результаты, полученные в диссертации, полностью отражены в

опубликованных работах. Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных журналах и изданиях из списка ВАК, доложены на международных и российских конференциях. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Считаю, что диссертационная работа **Волковой Марии Сергеевны** «Применение спутниковой радарной интерферометрии для изучения и моделирования полей смещений на склонах вулканов полуострова Камчатка», представленная на соискание степени **кандидата физико-математических наук** по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых, отвечает критериям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Официальный оппонент - заведующий лабораторией математической геофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук», чл.-корр. РАН, профессор, д.ф.-м.н.



Петр Сергеевич Мартышко

Я, Мартышко Петр Сергеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

«18» августа 2022 г.

