

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики
Российской академии наук
доктор физ.-мат. наук, член-корр. РАН

П.Н. Шебалин

« *август* » 2022 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук (ИТПЗ РАН) 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

Актуальность темы диссертационной работы

Спутниковые технологии мониторинга геодинамических процессов различного происхождения активно развиваются в последние десятилетия во всем мире. В сравнении с существующими спутниковыми методами изучения тектонически активных регионов, использованная в диссертации технология спутниковой радарной интерферометрии базируется исключительно на космическом измерительном сегменте и не требует установки какой-либо наземной регистрирующей аппаратуры. Этим, в первую очередь, объясняется актуальность разработок, направленных на применение такой технологии в труднодоступных регионах, многие из которых расположены, в частности, на территории РФ. Одним из таких регионов является полуостров Камчатка, в особенности, его центральные и

северные районы. Имеющиеся здесь разнообразные наблюдательные сети, в том числе, спутниковые геодезические станции (ГНСС) не образуют достаточно плотного покрытия и не имеют широкого охвата. С этой точки зрения, не вызывает сомнений актуальность выбранного в работе объекта исследования, а именно, вулканов Камчатки. Их извержения оказывают существенное влияние на многие стороны жизнедеятельности местного населения, а их пепловые шлейфы распространяются далеко за пределы региона, представляя серьёзную угрозу, в частности, для многочисленных авиационных трасс.

Одна из основных проблем, связанных с применением спутниковых радаров с синтезированной апертурой (РСА интерферометрия) в задачах геодинамики, состоит в интерпретации радарных наблюдений в условиях неустойчивого состояния земной поверхности, обусловленных сезонными сменами снегового и растительного покрова, что препятствует когерентности последовательных снимков. Кроме того, факторами, усложняющими интерпретацию, являются погрешности цифровых моделей рельефа и низкая отражающая способность природных ландшафтов. Один из подходов к решению данных проблем на основе численного моделирования геодинамических процессов предложен автором работы, что, безусловно, представляет собой актуальную задачу в области спутниковых методов изучения геодинамики.

Новизна работы состоит в развитии эффективных для территории Камчатки подходов к обработке спутниковых радарных снимков (РСА) на основе существующих стандартных технологий. Разработанные подходы, по существу, представляют собой рекомендации в отношении выбора параметров и порядка применения существующих алгоритмов обработки, оптимизированных для сложного рельефа полуострова Камчатка с характерными скальными выступами, горными хребтами, лавовыми полями. В результате применения разработанных сценариев обработки автором получены новые данные о смещениях на склонах ряда вулканов Камчатки. Для интерпретации полученных смещений в работе предложены термомеханические и математические модели соответствующих процессов в недрах вулканов и на их склонах. Совокупность методических разработок по анализу спутниковых радарных снимков, а также количественные характеристики и механизмы вулканической активности на Камчатке, безусловно, составляют **значимые для науки результаты** автора. При этом наиболее важными представляются: модель остывания Толбачинского лавового поля; модель внедрения дайки в постройку Корякского вулкана во время извержения 2008–2009 гг.; термомеханическая модель остывания пирокластического потока на вулкане Шивелуч.

Практическая значимость работы определяется, прежде всего, применимостью разработок автора для анализа измерений РСА в

труднодоступных районах со сложным горным рельефом и в условиях крайнего Севера. Предложенные модели остывания лавового поля, остывания пирокластического потока, внедрения дайки в постройку вулкана, позволили оценить физические свойства лавы (содержания пор и стёкол), картировать лавоводы и лавовые каналы, оценить физические параметры пирокластического потока, подтвердить гипотезу подъёма магмы во время извержения. Данные сведения в совокупности имеют крайне важное практическое значение для повышения безопасности расположенных в окрестности вулканов населенных пунктов и объектов инфраструктуры и подтверждают необходимость непрерывного мониторинга вулканов, в том числе с применением спутниковых технологий.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём работы составляет 97 страниц машинописного текста, в том числе 3 таблицы, 21 рисунок. Список цитируемых литературных источников включает 94 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту. Также приведены сведения о научной новизне, практической и теоретической значимости, апробации результатов и основных публикациях.

Первая глава содержит описание методологии применения спутниковых радаров с синтезированной апертурой (РСА) для наблюдений за смещениями земной поверхности. При этом подробно изложены все технологические особенности измерений, их пространственно-временная разрешающая способность, ограничения по применимости, ключевые проблемы и существующие подходы к решению проблем. Кроме того, приведен ряд моделей различных геодинамических процессов, использованных автором для интерпретации наблюдений РСА: площадки разрыва в упругом полупространстве с возможным присутствием сбросовой и сдвиговой компонентами, дислокации в сферической расслоенной Земле, термические процессы, связанные с лавовыми и пирокластическими потоками. Отмечена некорректность обратных задач, возникающих при использовании приведенных моделей для интерпретации наблюдений, и указаны возможные пути регуляризации: ограничение числа неизвестных параметров, дополнение минимизируемого функционала невязки наблюдений условием гладкости и т.д. Сделаны обоснованные выводы о применимости спутниковых радарных систем с различными длинами волн для территории полуострова Камчатка. В данной главе раскрывается основной методологический результат работы: технология обработки РСА снимков, эффективность которой в условиях полуострова Камчатка (низкая

когерентность радарных снимков, горный рельеф, существенное влияние атмосферы) обоснована путем массового тестирования на снимках С и L диапазона, что составляет первое защищаемое положение.

Вторая глава посвящена термическому остыванию поверхности лавового поля. В данной главе подробно рассмотрены результаты предшествующих исследований и отмечена необходимость учитывать скорость формирования мощности лавового слоя и конкретные параметры лав Толбачика. Ключевые уточнения, которые автором внесены в модель состоят в начальных условиях, в учете скрытой теплоты плавления, в зависимости физических свойств среды от температуры, в скорость формирования мощности лавового слоя. В результате автор закономерно приходит к выводам о сочетании так называемого «нормального» и «аномального» оседания поверхности лавовых потоков, отмечая, что большая часть лавового поля (90%) проявляет «нормальную» зависимость оседания от толщины лавы и может быть хорошо объяснена термическим охлаждением и уплотнением отложений лавы. В отношении «аномальной» части потока сделаны обоснованные предположения об особых условиях формирования лавового потока, в том числе, образование системы лавовых труб и каналов, способствовавших стеканию лавы во внешнюю часть поля. Данная глава обосновывает второе защищаемое положение, состоящее в уточненной термомеханической модели процесса оседания поверхности лавового поля.

В третьей главе рассмотрена модель внедрения дайки с целью проверки гипотезы о поступлении магматического расплава в формирующуюся трещину во время извержения вулкана Корякский 2008–2009 гг. Важность данной гипотезы обусловлена дискуссионным вопросом о причинах активизации вулкана и поиском возможных свидетельств подъема магмы в вулканическую постройку. Несомненно практическое значение этих вопросов для прогноза дальнейшего развития вулканической активности и связанной с этим опасности для населения, инфраструктуры и авиации. Для интерпретации наблюдаемого поля поверхностных смещений автором адаптирована широко известная модель Окада для деформации упругого полупространства в результате смещений по заглубленной площадке разрыва. Смысл адаптации состоял в преобразовании системы координат путем разворотов так, чтобы свободная поверхность модельного полупространства локально совпадала с наклонной поверхностью рельефа. Результаты моделирования свидетельствуют в пользу предположения о внедрении магматического материала в постройку вулкана и об активизации вулкана вследствие подъема магмы. Данная глава обосновывает третье защищаемое положение о математической модели формирования дайки в процессе извержения вулкана.

В четвертой главе представлена модель оседания пирокластического потока в процессе извержения вулкана Шивелуч 29 августа 2019 г. с целью выяснения механизма этого процесса. Для интерпретации наблюдаемого распределения скорости оседания потока предложена термомеханическая модель, учитывающая усадку за счёт термического охлаждения и компакцию отложений за счёт изменения во времени их пористости и плотности. Предложенная модель позволяет соотнести вклад обоих указанных механизмов и оценить их параметры. Кроме того, автор обращает внимание на разброс, который характеризует зависимость скорости оседаний поверхности потока от его мощности, что может свидетельствовать о проявлении не только остывания и уплотнения, но также эрозионных процессов. Материалы и выводы данной главы обосновывают четвертое защищаемое положение.

В заключении суммируются основные результаты, полученные автором в ходе работы над диссертацией.

Следует отметить, что автором проделан большой объем работы, обработан обширный экспериментальный материал. Все рассуждения и методы анализа в диссертации изложены весьма подробно и позволяют проверить обоснованность представленных выводов.

Вместе с тем, работа не лишена некоторых недочетов.

Замечания

1. При сравнении мощности лавы со скоростью ее оседания, полученной по данным радарной интерферометрии, разделение точек на рис.2.3 на две группы с нормальной и аномальной скоростью представлено весьма условно и нестрого – путем «визуального анализа». Учитывая размытость облака аномальных точек и отсутствие их кластеризации, следовало применить более строгие статистические критерии для определения аномальности.

2. При адаптации модели Окада к особенностям рельефа в третьей главе применимость модели обосновывается малыми отклонениями остаточного рельефа по сравнению с глубиной дайки. В то же время, следует учитывать, что модель Окада разрабатывалась для полупространства, ограниченного бесконечной плоской свободной поверхностью. Однако автор не уделяет внимание проверке вопроса, насколько малы размеры дайки по отношению к размеру локальной аппроксимирующей плоской поверхности, которая, очевидно, ограничена размерами склона и не является бесконечной.

3. Анализируя зависимость скорости оседаний поверхности пирокластического потока от его мощности в четвертой главе, автор отмечает их высокую корреляцию с коэффициентом -0.69 . Однако корреляцию с

коэффициентом до 0.7 (по абсолютной величине) принято считать средней, а не высокой.

4. Научная новизна работы во введении изложена излишне подробно и пространно, этот раздел следовало существенно сократить, выделив ключевые моменты.

5. Выводы к главам изложены излишне подробно, некоторые разделы содержат повторные утверждения, например, пункты 1 и 3 в разделе 3.4.

Указанные недостатки не снижают общей высокой оценки диссертации. Результаты и выводы, сформулированные в работе, закономерно вытекают из приведенных автором рассуждений и фактического материала. Суммируя результаты, представленные в диссертации, можно отметить, что автором представлен комплекс моделей, описывающих ряд наиболее важных процессов, сопровождающие вулканическую активность и имеющих наиболее существенное влияние на окружающую среду и жизнедеятельность человека.

Автор проанализировал обширный измерительный материал в виде снимков с разных спутниковых радарных систем, которые отличаются своими орбитальными и радиоволновыми характеристиками. Выводы о применимости и разрешающей способности спутниковых систем в зависимости от их характеристик будут крайне полезны при перспективных разработках аналогичных отечественных систем.

Заключение

Диссертация М.С. Волковой представляет собой законченное исследование, выполненное автором самостоятельно на высоком научном уровне. Представленная работа вносит вклад в развитие спутниковых методов изучения современных геодинамических процессов. Все материалы апробированы в ходе докладов на ряде конференций в России и за рубежом. По теме диссертации опубликовано 4 работы в рекомендованных ВАК периодических изданиях, в которых в полной мере отражены содержание исследований, основные выводы и защищаемые положения. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа М.С. Волковой соответствует критериям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842). Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых». Автор диссертации Волкова Мария Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Диссертационная работа и отзыв обсуждены 19.07.2022 г. на семинаре ИТПЗ РАН. Отзыв с положительным заключением ИТПЗ РАН в качестве ведущей организации одобрен решением семинара, протокол научного семинара №7 ИТПЗ РАН от 19.07.2022 г.

Отзыв составил:  Стеблов Григорий Михайлович
доктор физико-математических наук, профессор РАН, заместитель
директора по научной работе, главный научный сотрудник ИТПЗ РАН
Тел.: (495) 3341544, эл. почта: steblov@mitp.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской
академии наук (ИТПЗ РАН)
Адрес: 117997, Москва, улица Профсоюзная, 84/32
Эл. адрес: <http://www.itpz-ran.ru/>