

ОТЗЫВ

ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Тимофеевой Веры Анатольевны «Применение методов РСА-интерферометрии для исследования сейсмических событий в районе полуострова Камчатка и Командорских островов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Диссертационная работа Тимофеевой Веры Анатольевны посвящена исследованию сейсмических событий и соответствующей численной геодинамической интерпретации этих явлений с использованием методов спутниковой радарной интерферометрии в комплексе с имеющимися сейсмологическими, геологическими и геодезическими данными. Приведенные результаты работы относятся к региону полуострова Камчатка и Командорских островов, однако используемый подход может быть применен для исследования практически любых относительно сильных землетрясений по всему миру. Регион исследований отличается сложным рельефом (гористая местность и вулканы) и характеризуется неблагоприятными для дистанционного зондирования Земли метеорологическими условиями. Последние приводят к пространственным, в т.ч. слоистым, неоднородностям земных покровов, что существенно усложняет дистанционную диагностику, в т.ч. радиолокационную количественную и качественную оценку. Вместе с тем несмотря на довольно развитую (в отличие от других регионов страны) сеть полевых измерений, эти точечные наземные данные не дают полной характеристики событий, что затрудняет их геодинамическую интерпретацию. Поэтому предложенное в диссертационной работе комплексирование результатов спутниковой радарной интерферометрии в сочетании с технологиями наземных наблюдений актуально и обладает исключительно высоким потенциалом в исследовании сейсмических и вулканических процессов.

Современные спутниковые технологии, в том числе методы РСА-интерферометрии, активно используются во всем мире и вносят важный вклад в получение новых сведений о геодинамических процессах на Земле. В рассматриваемой диссертационной работе применение этих методов в сочетании с технологиями наземных наблюдений позволило получить ряд новых результатов по трем сейсмическим событиям (Ближне-Алеутскому и Южно-Озерновскому землетрясениям и сейсмической активизации в районе вулкана Большая Удина), что дает новую информацию для исследования геодинамики области сочленения Тихоокеанской, Евразийской и Северо-Американской тектонических плит,

включая динамику выделенных здесь более мелких литосферных плит. Этим определяется практическая значимость работы. Сформулированная в диссертационной работе цель и поставленные для ее достижения задачи полностью раскрыты в тексте.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 104 наименований. Объем работы составляет 121 страницу текста, 28 рисунков и 6 таблиц.

Во введении обоснована актуальность проблематики исследования, сформулированы цели и задачи работы, защищаемые научные положения, кратко описаны методы исследования, отражена научная новизна и практическая значимость результатов работы.

В первой главе приведена историческая справка о развитии РСА-технологий, описана область их применения, приводится перечень основных спутниковых миссий, оборудованных датчиками РСА. Также рассмотрены основные принципы и методы РСА-интерферометрии; практически пошагово описано применение метода дифференциальной интерферометрии (DInSAR), использовавшегося для оценки смещений земной поверхности в исследованиях всех трех рассмотренных в работе сейсмических событий; описан метод малых базовых линий (SBAS), примененный в исследовании возможной активизации вулкана Большая Удина. Также описаны используемые источники данных. Пояснены сложности процесса построения интерферограмм, в частности процесса развертывания фазы. Сделан важный акцент на верификации данных и получаемых результатов.

Вторая глава посвящена исследованию Ближне-Алеутского землетрясения (17.07.2017 г.) и построению новой модели поверхности разрыва этого события на основе данных РСА-интерферометрии. Приведен хороший обзор геодинамической обстановки в рассмотренной области произошедшего землетрясения. В частности, данное землетрясение интересно тем, что оно произошло в зоне сочленения трех тектонических плит: Тихоокеанской, Охотоморской и Берингии. В первом разделе главы приводится описание процесса оценки полей смещений земной поверхности (научное положение 1, выносимое на защиту) в результате землетрясения с использованием метода дифференциальной интерферометрии (DInSAR). В следующем разделе проанализированы уже имеющиеся модели поверхности разрыва этого землетрясения. В третьем разделе автором подробно описан использованный метод построения модели поверхности сейсмического разрыва на основе решения Ф. Поллитца, построенного для радиально расслоенной сферической модели Земли. В четвертом разделе представлена новая модель поверхности разрыва, основанная на данных спутниковой геодезии и спутниковой радарной интерферометрии (научное положение 2, выносимое на защиту). В частности, сначала численно проверена согласованность данных РСА-

интерферометрии и спутниковой геодезии, а также протестирована гипотеза о том, что сейсмический очаг состоял из двух разрозненных разрывов. Показано, что данные РСА-интерферометрии и GPS хорошо согласуются между собой только в рамках модели единого очага, в модели с двумя разрывами изолинии смещений не согласуются с данными о смещениях, полученных по дифференциальной интерферометрии. Далее автор описывает формальное решение обратной задачи с заданием смещений на пунктах GPS и полученных смещений по данным РСА-интерферометрии, приводятся полученные результаты и иллюстрации моделирования. Показано, что смещения на поверхности разрыва происходили неравномерно, особенно по глубине, также сделано заключение об отсутствии полностью запертых участков. Далее следуют выводы, которые логически следуют из материала главы, проанализировано расхождение моделей, построенных автором и его предшественниками в исследовании данного события на основе различных данных.

В третьей главе представлены результаты моделирования поверхности разрыва Южно-Озерновского землетрясения (29.03.2017 г.). Как и в предыдущей главе, описывается геодинамическая обстановка района исследования. Помимо того, в первом разделе главы приводится историческая сейсмичность региона. Во втором разделе описываются параметры этого землетрясения по данным сейсмических станций. Учитывая удаленность станций наблюдения от места землетрясения, вполне понятно, что в различных мировых обрабатывающих центрах параметры события разнятся. По тем же причинам отсутствуют оценки косейсмических смещений по данным стационарных пунктов ГНСС. Кроме того, нет возможности построить модель поверхности разрыва по волновым формам сейсмических записей по причине небольшой магнитуды землетрясения. Тем самым показано, что применение данных спутниковых миссий и методики дифференциальной интерферометрии стало фактически единственной возможностью определить смещения земной поверхности и построить модель поверхности сейсмического разрыва. Также обозначена задача уточнения расположения гипоцентра Южно-Озерновского землетрясения на основе построенных моделей. В третьем разделе показана достаточно большая и кропотливая работа по интерферометрической обработке спутниковых РСА-снимков миссий Sentinel-1A и ALOS-2, а также соответствующая оценка смещений земной поверхности вследствие землетрясения. При этом смещения показали лишь 4 интерферограммы, 3 из которых на основе снимков ALOS-2. На примере данного исследования также показаны сложности использования спутниковой радарной интерферометрии в периоды с мощным снежным покровом, который при различных метеорологических условиях может по-разному отражать/рассеивать сигнал радиолокатора и, соответственно, понижать качество результата. Наглядно

продемонстрировано, что длинноволновый радиолокатор PALSAR-2, установленный на спутнике ALOS-2, по сравнению с радиолокатором спутника Sentinel-1A дает более устойчивый результат, пригодный для интерферометрической обработки. Это показывает актуальность верификации данных из различных источников и получаемых результатов. В четвертом разделе автор приводит результаты построения новой модели поверхности разрыва Южно-Озерновского землетрясения на основе данных РСА-интерферометрии (научное положение 3, выносимое на защиту). Задача ставилась аналогично рассмотренной в главе 2, однако ввиду отсутствия данных о косейсмических смещениях по временным рядам GPS-наблюдений решение выполнено только по данным РСА-интерферометрии. Завершают главу обоснованные выводы.

В четвертой главе выполнен анализ сейсмической активизации 2017-2018 годов в районе вулкана Большая Удина и оценена возможность извержения этого вулкана (научное положение 4, выносимое на защиту). В первом разделе главы автором представлены результаты определения смещений земной поверхности по спутниковым РСА-снимкам (научное положение 1, выносимое на защиту). По сериям снимков радиолокатора С-диапазона Sentinel-1A за бесснежные периоды 2017 и 2018 гг. методом малых базовых линий выполнен поиск территорий (площадей) с относительно стабильным (когерентным) рассеянием на склонах вулкана и проанализированы соответствующие временные серии интерферометрических данных для оценки смещений устойчиво отражающих площадок. Далее выполнена верификация этих результатов методом дифференциальной интерферометрии по данным спутникового радиолокатора L-диапазона ALOS-2. Из полученных результатов сделано заключение, что существенных смещений в периоды спутниковой радарной съемки в 2017 и 2018 годах на склонах вулкана Большая Удина не наблюдалось. В совокупности с оценками размера области смещений на земной поверхности в зависимости от глубины магматической камеры по решению Моги сделано предположение о малой вероятности извержения вулкана, а сейсмическая активизация объясняется процессом отступления и погружения магматического расплава от вулкана Большая Удина. Во втором разделе описаны сейсмологические наблюдения, также подтверждающие это предположение. К настоящему времени активизация вулкана не произошла, что подтверждает правильность интерпретации полученных результатов.

В заключении сформулированы основные выводы, полученные в диссертационной работе.

Вопросы и замечания:

1. Учитывалась ли слоистая структура влажности почвы при исследовании Южно-Озерновского землетрясения? Например, слоистость влажности

почвы могла образоваться после дождя и это могло повлиять на интерферометрическую фазу. В этом же контексте, также актуален вопрос о толщине и возможной слоистости снежного покрова в районе Южно-Озерновского землетрясения

2. На стр. 82 автор отмечает, что «убеждаемся в предположении о наличии в изучаемом районе мощного и неоднородного слоя снега в большую часть периода съемки, сильно рассеивающего сигнал РСА-датчика Sentinel-1A». Здесь очевидно, что снежный покров внес определенный фазовый сдвиг в т.ч. и для радиолокатора PALSAR-2. Однако выделенное выражение не приемлемо в данном контексте, т.к. придает другой смысл.
3. В исследовании сейсмической активизации в районе вулкана Большая Удина видится, что 10 и 12 снимков в серии мало для метода SBAS. В алгоритме SARscape минимальное количество снимков обозначено равным 20.

В целом, приведенные вопросы и замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Работа отличается хорошей проработкой материала, строгой логикой изложения, четким обоснованием выводов, написана понятным профессиональным языком, хорошо иллюстрирована и содержит необходимые ссылки. Структура работы цельная, содержание соответствует поставленным целям и задачам исследования.

Проведенный анализ материалов диссертации указывает, что диссертация Веры Анатольевны Тимофеевой актуальна, обладает научной новизной и практической значимостью, результаты исследований апробированы и имеют высокую перспективу для развития дальнейших исследований.

Диссертация и автореферат по структуре и оформлению соответствуют требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011. При использовании материалов и отдельных результатов в работе имеются ссылки на авторов и источники заимствования. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации, отражает ее структуру и выносимые на защиту научные положения, содержит полный перечень публикаций автора по теме диссертации.

В целом, диссертация соответствует критериям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор В.А. Тимофеева заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

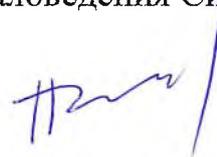
Я, Чимитдоржиев Тумэн Намжилович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

заведующий сектором оптико-микроволновой диагностики и обработки космической информации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения РАН,

доктор технических наук, профессор РАН

Тумэн Намжилевич Чимитдоржиев



670047, Россия, Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

tchimit@ipms.bsnet.ru

Тел.: (3012) 43-31-84, 41-68-00

22 августа 2022 г.

Подпись Т.Н. Чимитдоржиева заверяю

Заместитель директора ИФМ СО РАН,

к.ф.-м.н.



Б.З. Гармаев