

## 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.

Диссертация В.А.Тимофеевой посвящена изучению сейсмических процессов в районе полуострова Камчатка и Командорских островов методами дифференциальной спутниковой РСА-интерферометрии: оценке полей смещений земной поверхности и их численной геодинамической интерпретации в комплексе с имеющимися сейсмологическими, геологическими и геодезическими данными. Работа представляет большой интерес, так как в настоящее время этот метод используется недостаточно широко, хотя, как показано в диссертации, с его помощью могут быть получены результаты, существенно расширяющие наши представления о процессах в очаге сильного землетрясения.

Во Введении автор приводит все формально требуемые характеристики представленной диссертационной работы. В этой вводной части диссертации сформулированы цель работы и главные решаемые задачи, обоснованы актуальность исследования и достоверность результатов, представлен личный вклад автора. На защиту вынесены четыре защищаемых положения.

**Актуальность.** Далеко не всегда районы с активной геодинамикой (сильные землетрясения, вулканы и т.д.) обеспечены сейсмологическими и геодезическими наблюдениями в достаточной мере. Особенно это касается удаленных и безлюдных районов. Это существенно ограничивает возможности по анализу, интерпретации и (в перспективе) прогнозированию геодинамических процессов. Рассматриваемый диссертантом подход ориентирован на исправление такой ситуации. Актуальность

работы состоит именно в этом, а в частности: разработать и внедрить соответствующие методики, позволяющие получить результаты, недоступные сейсмологическим подходам, или улучшить результаты, полученные другими методами.

**Новизна и достоверность.** Диссертант выбрал в качестве объектов своего исследования три ярких явления последнего десятилетия на Камчатке (два сильных землетрясения на границе наблюдательных сетей Камчатского филиала Единой геофизической службы РАН и сейсмическую активизацию «потухшего» вулкана Удина), чьи особенности в настоящее время неоднозначно трактуются в научном сообществе. Применяемый впервые для этих объектов метод РСА-интерферометрии обеспечил получение новых данных, достоверность которых обеспечивается метрологическим обеспечением наблюдений и квалифицированной обработкой. Новые результаты расширяют наши представления о рассматриваемых процессах, даже несмотря на дискуссионность отдельных положений.

**Теоретическая и практическая значимость работы** не вызывает сомнений. Результаты работы могут быть использованы при анализе сильных землетрясений (причем не только проблемных в смысле удаленности или обеспеченности другими видами наблюдений), а также и других природных и антропогенных процессов, связанных с деформациями среды.

**Методы исследования.** В работе получили развитие методы оценки смещений на природных объектах, в том числе в условиях, сложных для РСА-интерферометрии (горный рельеф, снежный покров, растительность). Для исследования применялись метод дифференциальной интерферометрии (DInSAR) и метод малых базовых линий (SBAS).

**На защиту выносятся:**

1. Оценки полей смещений земной поверхности и их конфигурации для трех областей сейсмической активизации в районе полуострова Камчатка и

Командорских островов, впервые полученные с помощью адаптированных для данного региона методов РСА-интерферометрии.

2. Модель поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 на основе данных РСА-интерферометрии и спутниковой геодезии, позволившая получить новые сведения о строении очага этого сейсмического события.

3. Новая модель поверхности разрыва Южно-Озерновского землетрясения 29.03.2017, основанная на анализе серии летних снимков спутника ALOS-2 с использованием методов РСА-интерферометрии, уточняющая сведения о системе подвижек в очаге этого сейсмического события.

4. Сейсмическая активизация в районе вулкана Большая Удина, исследованная с применением методов РСА-интерферометрии и сейсмологических наблюдений, не является предвестником крупного извержения, а скорее связана с отступлением магматического материала в более глубокий очаг, расположенный юго-западнее вулкана.

Основные результаты исследования были представлены на 14 научных конференциях (в том числе международных), а также опубликованы в 10 статьях, в том числе в 3 статьях в ведущих научных рецензируемых журналах, входящих в перечень журналов ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. В диссертации 121 страница текста, 28 рисунков, 6 таблиц. Список литературы включает 104 наименования.

#### **Анализ диссертационной работы.**

**Глава 1. РСА-интерферометрия.** Дана историческая справка о развитии РСА-технологий, рассмотрены основные принципы и методы РСА-интерферометрии, подробно описан метод дифференциальной интерферометрии, применяемый в диссертационной работе.

Пошагово приводятся все этапы построения дифференциальной интерферограммы, включающие в себя отбор подходящих РСА-изображений на основе ряда критериев, генерацию синтетической интерферограммы и корегистрацию снимков, фильтрацию корегистрированных снимков, генерацию интерферограммы снимков и построение карты их когерентности, последующее вычитание синтетической интерферограммы применение фазовых фильтров, вычисление абсолютных значений фаз (развертка фаз) и их преобразование в абсолютные значения высот/смещений и геокодирование.

Оппонент не увидел обзора работ по непосредственной тематике диссертации. Представляется, что фраз *«Спутниковые РСА-снимки используются для ... оценки смещений земной поверхности и техногенных объектов»* и *«В последние годы довольно много исследований направлено на идентификацию устойчивых отражателей на природных объектах, имеющих плохую отражательную способность»*, а также *«Важными приложениями ... являются изучение сейсмических деформаций и вулканической активности...»* – недостаточно без ссылок на литературу. Хотелось бы видеть не только ссылки, но и анализ полученных в мире результатов. Ведь именно в этом цель обзора.

Касаемо методики, у оппонента нет ясности, как можно определить покрыта снегом земная поверхность или нет. Очевидно, что привязка по календарному месяцу в сложных пространственно-климатических условиях Камчатки некорректна. Также в работе не аргументирован выбор порога когерентности 0.3, что является достаточно низким значением. Вероятно, такой выбор определен компромиссными соображениями, но об этом ничего не сказано.

**Глава 2. Построение новой модели поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 на основе данных РСА-интерферометрии.** Представлена новая модель поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения (БАЗ), произошедшего 17 июля 2017 г. в районе Командорских островов Алеутской островной дуги с  $M_w=7.6$ . Модель построена с использованием полей смещений, полученных по радарным снимкам спутника Sentinel-1B для островов Беринга и Медный.

Данные РСА-интерферометрии не подтверждают гипотезу о том, что разрыв состоял из нескольких, несвязанных между собой участков. РСА-данные о смещениях на о. Медный показывают, что расположенный в его окрестности участок разлома Беринга испытал существенные смещения. Модель, содержащая два ряда элементов на глубинах до 10 км и от 10 до 19 км, показывает, что смещения на поверхности разрыва происходили неравномерно, особенно по глубине, но полностью запертых участков, по всей вероятности, все же не осталось.

Наименьшие значения смещений в моделях из 5 и 8 элементов получены в центральной части разлома Беринга, там, где зарегистрировано плотное облако афтершоков. Это, возможно, указывает на заполнение дефицита смещений на постсейсмическом этапе.

Диссертант связывает расхождение моделей, построенных на основе различных данных, со следующим: изучение очага землетрясения по сейсмологическим данным позволяет судить о процессе разрыва длительностью в первые минуты, в то время как оценки смещений земной поверхности, полученные по данным ГНСС и РСА-интерферометрии на большом временном интервале, характеризуют смещения, происходящие, в том числе, и в асейсмическом режиме. Поэтому полученные в построенных моделях смещения более равномерно распределены по площади 370-ти километровой поверхности разрыва, в отличие от моделей, построенных по анализу волновых форм.

Но тогда выходит, что модель с двумя очагами изложенная в [32], хотя не подтверждается, но и не опровергается. Но диссертант прямо об этом нигде в диссертации не говорит. Более того, фраза *«полностью запертых участков, по ВСЕЙ ВЕРОЯТНОСТИ, все же не осталось»* (стр. 67, Выводы к Главе 2) однозначно отражает взгляд диссертанта.

Кроме этого, к Главе 2 можно дать следующие замечания редакционного типа: 1) трансформный разлом Беринга ошибочно назван *«надвигом Беринга»* (стр. 48); 2) На стр.48 указано, что *«БАЗ произошло в зоне сейсмической брешы»*. Но широко известная (даже знаменитая) сейсмическая брешь связывается не с разломом Беринга (где было БАЗ), а с трансформным разломом Стеллера (фронтальная часть Алеутской дуги). См.[31]. Соответственно, упомянутая брешь

закрыться в результате БАЗ не могла; 3) На стр. 54 указаны размеры модели, не соответствующие первоисточнику [32].

**Глава 3. Построение модели поверхности разрыва Южно-Озерновского землетрясения 29.03.2017 по данным РСА-интерферометрии.** Представлена новая модель поверхности разрыва Южно-Озерновского землетрясения (ЮОЗ), произошедшего 29 марта 2017 г. в западной части Берингова моря с  $M_w=6.6$ .

Определение косейсмических смещений ЮОЗ по данным стационарных пунктов ГНСС оказалось невозможным в силу удаленности ближайших пунктов от эпицентра события. В силу относительно небольшой магнитуды землетрясения построить модель поверхности разрыва по волновым формам сейсмических записей также не удалось. Поэтому применение данных спутниковых миссий и метода DInSAR для снимков, полученных с помощью РСА, стало практически единственной возможностью определить смещения земной поверхности и построить модель поверхности сейсмического разрыва, которая была успешно реализована, а результаты продемонстрировано в диссертации.

Кроме того, проанализировано утверждение работы [35] о том, что эпицентр ЮОЗ располагался существенно северо-восточнее, чем это представлено в каталоге NEIC и соответствует определению КФ ФИЦ ЕГС РАН и близко к определению GSMT. На основании невозможности подобрать адекватную модель для «восточного» очага, диссертант заключает, что землетрясение произошло ближе к берегу, чем утверждается в [35]. Оппонент отмечает слабость такой аргументации. В этом случае, по мнению оппонента. Необходимо было аргументировано дезавуировать (хотя бы указать слабые стороны) определения КФ ФИЦ ЕГС РАН и GSMT. Но, учитывая данные, приведенные в [35], это сделать непросто. При этом возникает вопрос: почему автор решил не приводить «плохие» решения хотя бы с целью демонстрации своего выбора?

К Главе 3 делаются следующие замечания: 1) В тексте (стр.84) не описана процедура назначения параметров модели. Это вызывает непонимание. Например, почему площадка назначена вблизи эпицентра NEIC, если автор в разделе 3.2 пишет, что координаты ФИЦ ЕГС РАН следует признать более достоверными? Или почему угол подвижки выбран по GSMT (стр.87), когда местоположение

тяготеет к определению NEIC? Этот вопрос относится и к четвертой модели (стр.88), где взята нодальная плоскость по GCMT.

Кроме этого, к Главе 3 даются следующие замечания редакционного типа: 1) При описании исторической сейсмичности (раздел 3.1) ряд положений в описании не сопровождается ссылками и рисунками, ряд географических объектов не отмечены на картах; 2) Шкалы на паре рисунков 3.4 неодинаковы, что затрудняет их восприятие; 3) Непонятно о каких *«предыдущих»* землетрясениях идет речь на стр.91. И что за предположения об их механизме strike-slip? 4) Вывод, аналогичный указанию *«на то, что разрыв ЮОЗ произошел на иной системе разломов, связанной с береговыми горными хребтами»* (стр.91) есть в [35], где речь идет о разломах на суше. Следовало бы указать отличия новой интерпретации.

**Глава 4. Оценка возможности извержения вулкана Большая Удина.** Описывается исследование сейсмической активности в районе вулкана Большая Удина, наблюдавшейся с конца 2017 г., проведенное совместно с коллегами из Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН. На основе анализа сейсмических и спутниковых данных предлагается модель, в которой сейсмическая активизация объясняется процессом отступления и погружения магматического расплава от вулкана Б. Удина в очаг, выделенный томографическими методами в районе р.Толуд.

**В разделе 4.1** **Оценки смещений земной поверхности в районе вулкана по спутниковым данным** приводятся оценки смещений земной поверхности в районе вулкана по спутниковым данным. Использовалось решение Моги для оценки размера области смещений на земной поверхности в зависимости от глубины магматической камеры. Полученные результаты показывают, что существенных смещений в периоды спутниковой радарной съемки в 2017 и 2018 годах на склонах вулкана Б. Удина не наблюдалось. Это интерпретируется либо как малая активность глубинных процессов, либо, что более вероятно, по мнению диссертанта, как то, что вызвавшие повышенную сейсмическую активность процессы, происходили на большой глубине.

Однако, судя по рис.4.2 (стр. 95), в 2017 году смещения наблюдались. К сожалению, в отсутствие доверительные интервалов затруднительно оценить их

значимость. Также, по мнению оппонента, источник повышенных напряжений не обязательно совпадает в пространстве с облаком появившихся на глубинах до 10 км землетрясений. Впрочем, это не противоречит упомянутому выше мнению диссертанта.

Полученные результаты очень важны для изучения ситуации на потухшем вулкане Удина, и они будут, несомненно, полезным аргументом в продолжающейся дискуссии о процессе, наблюдающемся с 2017 г.

В разделе 4.2 Сейсмологические наблюдения приводится анализ сейсмологических наблюдений, проведенный коллегами диссертанта из Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Он показал, что с октября 2017 г. по август 2019 г. центр сейсмической энергии (ЦСЭ), характеризующий положение области, где происходят основные сейсмические события, систематически смещался от вулкана Б. Удина на юг.

К сожалению, уровень этого анализа не соответствует уровню всей остальной диссертации. Указываю на две методические ошибки, сделанные коллегами диссертанта, которые не позволяют в настоящее время принять их выводы безоговорочно. 1) Судя по рис. 4.4 не были введены ограничения на нижний энергетический порог используемого каталога (представительность каталога); 2) На рис.4.4., даже на перегруженной лишними землетрясениями карте эпицентров землетрясений (На ней приведены данные за 20 лет, хотя анализируются лишь 2 года) видно раздельное положение кластеров землетрясений Толудской зоны и вулкана Удина. В этом случае, совместно по двум раздельным и независимым (пока не доказано обратное) кластерам, в принципе невозможен расчет «среднего» землетрясения.

Следует отметить появление в Выводах к Главе 4 фразы о *«наличии гидравлической связи между районом р. Толуд и районом ... Толбачика»*. Этот вопрос в диссертации не рассматривался. Даже неясно, что подразумевается под гидравлической связью. И причем здесь вулкан Удина. Непонятно и продолжение: *«Описанная выше (? Прим. опп.) гидравлическая связь делает вулкан Б. Удина маловероятным местом нового извержения»*. Какое отношение вулкан Удина имеет к гипотетической гидравлической связи Толуд-Толбачик?

**В целом, в диссертации представлен обширный фактический материал, собранный и обработанный Тимофеевой Верой Анатольевной с использованием ряда современных методов геофизической практики. Отдельная ценность рассматриваемой работы в том, что диссертант в качестве объектов своего исследования выбрал уникальные проявления сейсмической активности, привлекая внимание специалистов различных специализаций и вызвавшие оживленную дискуссию в научной среде. Поэтому результаты диссертации несомненно востребованы. Указанные оппонентом замечания не снижают научную значимость диссертации Тимофеевой В.А.**

### **Общая оценка диссертационной работы**

Диссертация Тимофеевой Веры Анатольевны на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук представляет собой законченную научно-квалификационную работу, обладает несомненной новизной и выполнена на актуальную тему.

Результаты и выводы диссертационной работы доведены до сведения научной общественности в виде большого количества публикаций и докладов на научных конференциях разного уровня. Все заявленные автором защищаемые положения раскрыты и хорошо обоснованы.

Автореферат диссертации в полной мере отражает содержание и основные результаты диссертационных исследований. Диссертация Тимофеевой В.А. полностью соответствует паспорту специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

По своему содержанию, научной новизне и практической ценности полученных результатов диссертация Тимофеевой Веры Анатольевны «Применение методов РСА-интерферометрии для исследования сейсмических событий в районе полуострова Камчатка и Командорских островов» полностью соответствует требованиям и критериям п. 9, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, установленным в «Положении о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., № 842), «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской

Федерации от 21 апреля 2016 г., № 335), а её автор Тимофеева Вера Анатольевна достойна присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Я, Салтыков Вадим Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой Совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

главный научный сотрудник лаборатории сейсмического мониторинга  
Камчатского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения  
науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба  
Российской академии наук»,  
доктор физико- математических наук,  
доцент

Вадим Александрович Салтыков

Адрес: 683006, г. Петропавловск-Камчатский, бул. Пийпа, дом 9.

e-mail: salt@emsd.ru;

Тел. 8-961-9602961

24 августа 2022 года

Подпись д.ф.-м.н., доцента Салтыкова В.А.

заверяю

Начальник ОК КФ ФИЦ ЕГС РАН

Мамонова Татьяна Львовна

