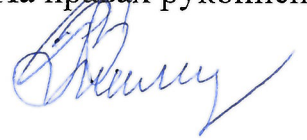


На правах рукописи



Тимофеева Вера Анатольевна

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ РСА-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ
В РАЙОНЕ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА
И КОМАНДОРСКИХ ОСТРОВОВ**

Специальность 25.00.10

«Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в лаборатории комплексной геодинамической интерпретации наземных и спутниковых данных (502) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

**Научный
руководитель:**

Михайлов Валентин Олегович
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией комплексной геодинамической интерпретации наземных и спутниковых данных (502) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

**Официальные
оппоненты:**

Ведущая организация:

Защита диссертации состоится «___» _____ 2022 г. в ___:00 часов на заседании Диссертационного совета Д.002.001.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации www.vak.minobrnauki.gov.ru и на сайте ИФЗ РАН www.ifz.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в двух экземплярах, просьба направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр.1, ИФЗ РАН, ученому секретарю Диссертационного совета Камзолкину Владимиру Анатольевичу.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук

В.А. Камзолкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Курило-Камчатская зона субдукции и прилегающие регионы находятся на сочленении Тихоокеанской, Северо-Американской и Евразийской тектонических плит, но положение границ двух последних на территории Сибири и на Дальнем Востоке, как и наличие более мелких плит (Берингии, Охотоморской, Амурской), остается до настоящего времени дискуссионным. Простая схема, в которой Северо-Американская плита занимает весь северо-восток России до хребта Черского, не согласуется с данными спутниковой геодезии, сейсмологии и геодинамики.

Методы спутниковой геодезии, в том числе глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) и спутниковые радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), наряду с сейсмологическими исследованиями, вносят основной вклад в изучение сейсмических событий в районе полуострова Камчатка и Командорских островов. Кроме того, изучение полей смещений на склонах вулканов и в областях землетрясений дает новую информацию о развитии современных тектонических процессов.

Степень разработанности темы исследования. Представленное исследование продолжило основную линию работ лаборатории комплексной геодинамической интерпретации наземных и спутниковых данных (502) ИФЗ РАН – геодинамическую интерпретацию геофизических, геодезических и геологических данных на основе численных моделей исследуемого природного процесса. Эта технология начала разрабатываться сотрудниками лаборатории еще в середине 70-х годов под руководством академика В.П. Мясникова. Данный подход имеет целый ряд преимуществ. Если геодинамическая модель достаточно детально описывает различные стороны развития природного процесса, то в ее рамках можно согласовать практически все имеющиеся данные, а обратная задача сводится к определению конечного набора параметров геодинамической модели [Михайлов и др., 2007].

Так, при построении модели поверхности сейсмического разрыва удается согласовать амплитуды смещений земной поверхности по данным РСА-интерферометрии и геодезии, геофизические поля, учесть данные сейсмологии и полевых сеймотектонических наблюдений. Без применения геодинамического подхода эти данные сопоставить не удастся. Действительно, данные РСА-интерферометрии фиксируют смещения многочисленных отражающих объектов в направлении на спутник, менее многочисленные станции ГНСС измеряют смещения на восток и север, а при достаточно длительных наблюдениях и по вертикали. Для очень сильных землетрясений можно использовать ежемесячные гравитационные модели спутников GRACE, которые слабо отражают смещения земной поверхности, но в основном характеризуют косейсмические и постсейсмические изменения поля напряжений, и, следовательно, плотности пород в огромных объемах мантии и литосферы.

Целью данной работы являлось изучение сейсмических процессов в районе полуострова Камчатка и Командорских островов методами дифференциальной спутниковой РСА-интерферометрии: оценка полей смещений земной поверхности и их численная геодинамическая интерпретация в комплексе с имеющимися сейсмологическими, геологическими и геодезическими данными.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Отобрать и систематизировать спутниковые снимки для недавних сейсмических событий на полуострове Камчатка и Командорских островах с учетом критериев согласованности (когерентности) снимков, величины пространственной и временной базовых линий, времени съемки, а также метеорологических условий и наличия снежного покрова.

2. Провести расчеты для всех областей землетрясений, для которых удалось найти пары качественных снимков, и выявить события, для которых метод РСА-интерферометрии позволяет оценить смещения земной поверхности в период сейсмической активности.

3. Для каждого события провести серии расчетов и определить оптимальные параметры обработки спутниковых РСА-снимков методом дифференциальной интерферометрии, позволяющие устойчиво оценивать поля смещений в условиях полуострова Камчатка и Командорских островов.

4. Для выбранных событий собрать данные наземных геологических наблюдений, данные о координатах и механизме очага по каталогам мировых и локальных сейсмических сетей, данные о смещениях на пунктах постоянной сети ГНСС станций.

5. Для каждого выбранного события на основе определенных полей смещений и собранных наземных данных построить геодинамическую модель. Оценить параметры сейсмических событий (размеры поверхности разрыва и поле смещений на ней) путем решения соответствующих обратных задач в рамках построенной геодинамической модели.

6. Выполнить интерпретацию полученных результатов.

Методология и 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, применяется метод дифференциальной интерферометрии (DInSAR) и метод малых базовых линий (SBAS). На первом этапе обработки спутниковых данных осуществляется сравнение фаз радарных сигналов, отраженных от одной и той же площадки на поверхности Земли при повторной съемке. РСА-снимок представляет собой матрицу комплексных чисел, модуль которых равен амплитуде отраженного сигнала, а фаза равна сдвигу излученного и принятого радиолокационного сигнала. Совмещение (корегистрация) снимков выполняется на основании сопоставления соответствующих амплитуд. Затем вычисляется комплексная интерферограмма, каждый элемент которой равен произведению сигнала первого снимка на комплексно сопряженный сигнал второго снимка. В результате фаза каждого элемента комплексной интерферограммы оказывается равной разности фаз двух радиолокационных снимков. Разность фаз, полученная после введения поправок за топографию и кривизну Земли, характеризует изменение расстояний от данного элемента разрешения до спутника вдоль линии распространения радарного сигнала (LOS). Кроме того, значения фазы содержат и различного рода помехи, связанные с влиянием атмосферы (влажность, температура, изменение давления между съемками), ошибками задания цифровой модели рельефа и орбит, и аппаратурными шумами (изменение отражателей, изменение угла обзора):

Интерферограмма содержит не абсолютные значения фазового сдвига, а значения, свернутые по модулю 2π . Проблема фазовой неоднозначности решается так называемой развёрткой фазы. Задача перехода к абсолютным значениям фазы сводится к добавлению необходимого числа полных фазовых циклов к каждому фазовому измерению.

На завершающем этапе фаза развернутой дифференциальной интерферограммы переводится в значение смещений земной поверхности. При этом важно учитывать, что полученные смещения характеризуют сдвиг отражающей площадки в направлении на спутник, т.е. являются суммой смещений на север, восток и по вертикали, умноженных на косинусы и синусы угла наклона зондирующего луча и азимута полета [Hanssen, 2001]. Это обстоятельство легко учесть при решении обратной задачи, поскольку эти углы известны. Более детальное описание в русскоязычной литературе можно найти, например, в [Михайлов и др, 2013, 2014; Дмитриев и др., 2012; Киселева и др, 2017].

Далее строится модель исследуемого процесса – модель поверхности разрыва (на основе решения Ф. Поллитца [Pollitz, 1996, 1997]) или модель магматической камеры (на основании решения Моги [Mogi, 1958]), и определяются их параметры путем решения соответствующих обратных задач.

Возникающие обратные задачи являются некорректно поставленными по Адамару. Для их решения применяются различные методы регуляризации [Тихонов, Арсенин, 1986]. В том числе решения строятся с учетом данных геодезии, сейсмологии и наземных геологических исследований.

Научная новизна и практическая значимость исследования. Определение положения и размеров очаговой зоны землетрясений (Ближне-Алеутского и Южно-Озерновского), а также соответствующие им поля смещений в районах, удаленных от станций мировых сейсмических и геодезических сетей, дают новую информацию о структуре и динамике области сочленения Тихоокеанской, Евразийской и Северо-Американской тектонических плит. Полученные результаты вносят вклад в решение фундаментальной задачи исследования геодинамики этой сложнейшей области, включая динамику выделенных здесь более мелких литосферных плит. Результаты по вулкану Большая Удина показали, что сейсмическая активизация не является предвестником крупного извержения, но, вероятно, указывает на отступление лавы в более глубокий магматический резервуар.

Положения, выносимые на защиту:

1. Впервые определены поля смещений для трех областей сейсмической активизации в районе полуострова Камчатка и Командорских островов. Для Ближне-Алеутского землетрясения интерферограмма, построенная по паре снимков от 11.07.2017 и 23.07.2017 спутника Sentinel-1B, выявила наиболее четкие смещения в направлении на спутник от 22 до 37 см на о. Медный и от 72 до 74 см на о. Беринга. Для Южно-Озерновского землетрясения впервые оцененные смещения в направлении LOS по летним снимкам спутника ALOS-2 с восходящего 108 трека достигли 33.1 см, что почти в 3 раза больше оценок, полученных ранее по зимним снимкам спутника Sentinel-1A. Смещения на склонах вулкана Большая Удина в период сейсмической активизации, определенные по временным сериям снимков спутника Sentinel-1A за 2017 и 2018 годов и по парам снимков спутника ALOS-2 не превосходят первые сантиметры и по своим пространственным масштабам не соответствуют смещениям, которые могли быть

связаны с подъемом магмы на глубину в 5 км, где фиксировалась повышенная сейсмическая активность.

2. Впервые построена 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. Данные РСА-интерферометрии не подтверждают гипотезу о том, что разрыв состоял из двух, несвязанных между собой участков. Показано, что смещения на поверхности разрыва происходили неравномерно, особенно по глубине, но полностью запертых участков, по всей вероятности, все же не осталось.

3. Для Южно-Озерновского землетрясения 29.03.2017 построена новая модель поверхности разрыва, основанная на летних снимках спутника ALOS-2, которые показали существенно большие смещения, чем зимние снимки. Модель с падением на северо-запад с углом простираия 213° и углом падения 51° представляется наиболее предпочтительной. Она указывает на то, что разрыв этого сейсмического события, возможно, произошел на системе разломов, связанной с береговыми горными хребтами.

4. На основе комплексного исследования причин сейсмической активизации в районе вулкана Большая Удина сделан вывод об отсутствии признаков внедрения магматического материала от очага в районе реки Толуд в сторону вулкана Большая Удина. Анализ данных, выполненный с использованием спутниковых снимков различной длины волны и различных методов их обработки (парные интерферограммы и временные ряды), не выявил существенных смещений земной поверхности в районе вулкана Большая Удина. Полученные по снимкам спутниковых миссий смещения за 2017 и 2018 годы могут указывать либо на малую активность глубинных процессов, либо на то, что эти процессы связаны с отступлением магмы в более глубокий магматический очаг.

Личный вклад. Автором выполнены: выбор изучаемых событий (Ближне-Алеутское землетрясение 2017, Южно-Озерновское землетрясение 2017 и сейсмическая активизация в районе вулкана Большая Удина); отбор и систематизация соответствующих спутниковых снимков; отбор данных наземных геологических наблюдений, данных о координатах и механизме очага по каталогам мировых и локальных сейсмических сетей, данных о смещениях на пунктах постоянной сети ГНСС станций; проведение серии расчетов для выбранных событий и определение оптимальных параметров обработки спутниковых РСА-снимков методом дифференциальной интерферометрии, оценка смещения земной поверхности в период сейсмической активности; постановки обратных задач в рамках построения геодинамических моделей; интерпретации полученных результатов выполнены совместно с научным руководителем.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов подтверждается их согласованностью с данными сейсмологии, и достигается, в том числе, путем взаимной верификации данных, полученных по снимкам с различных спутниковых миссий, оборудованных РСА с длинами волн различных диапазонов, и с применением различных методов выделения деформационных сигналов.

Апробация работы. Результаты представлены на 14 научных конференциях, в том числе международных (всего 17 докладов, 12 из которых представлено лично автором диссертационной работы): НОШ «Космос» на «Ломоносовских чтениях»,

секция «Фундаментальные и прикладные исследования космоса», МГУ, Москва, Россия, 20-22 апреля 2022; Семнадцатая и девятнадцатая международные конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)», ИКИ РАН, Москва, Россия, 11-15 ноября 2019 и 15-19 ноября 2021; I и II Всероссийские научные конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», ИТПЗ РАН, Москва, Россия, 27-28 ноября 2019 и 29-30 сентября 2021; FRINGE 2021, Нидерланды, 31 мая - 4 июня 2021; Образовательный модуль «Аппроксимационные подходы в задачах геоинформатики и анализа геофизических данных», Федеральная территория "Сириус", Россия, 4-17 мая 2021; Выставка "Космос и наука о Земле" в Министерстве науки и высшего образования РФ, посвященная 60-летию первого полета человека в космос, Минобрнауки РФ, Москва, Россия, 12-14 апреля 2021; Joint PI Meeting of JAXA Earth Observation Missions FY2020, Япония, 18-22 января 2021; Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН 2019 и 2020, ИФЗ РАН, Москва, Россия, 22-23 апреля 2019 и 28-29 октября 2020; Школа-семинар «Аппроксимационные подходы и анализ геофизических данных», Москва, Россия, 13-18 июля 2020; Workshop “Geodynamics, earthquakes, and volcanism in subduction zones”, Петропавловск-Камчатский, Россия, 8-14 сентября 2019; VI Международная научно-практическая конференция "Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование", МПГУ, Москва, Россия, 29 ноября - 1 декабря 2018.

По теме диссертации опубликовано 9 работ, из которых 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. В диссертации 122 страница текста, 28 рисунков, 6 таблиц. Список литературы включает 104 наименования.

Благодарности. Автор диссертационной работы выражает благодарность научному руководителю – чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессору Валентину Олеговичу Михайлову, а также коллегам из ИФЗ РАН, ИТПЗ РАН, КФ ФИЦ ЕГС РАН и ГЦ РАН за важные дискуссии, советы и предоставленные материалы. Также автор благодарен Европейскому космическому агентству (ESA) за возможность использования снимков со спутника Sentinel-1A/B и открытого программного пакета SNAP со встроенным плагином развертки фазы SNAPHU, а также Японскому аэрокосмическому агентству (JAXA) за снимки со спутников ALOS-1/2, подставленные в рамках научного проекта ER2A2N075.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-35-90092 «Исследование сейсмических и вулканических процессов на основе комплексной геодинамической интерпретации спутниковых и наземных данных» (руководитель – В.О. Михайлов), а также гранта Министерства образования и науки Российской Федерации № 14.W03.31.0033 «Геофизические исследования, мониторинг и прогноз развития катастрофических геодинамических процессов на Дальнем Востоке РФ» (руководитель – Н.М. Шапиро).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В разделе 1.1 описывается история развития РСА, область их применения, приводится перечень основных спутниковых миссий, оборудованных датчиками РСА.

В разделе 1.2 излагаются основные принципы и методы РСА-интерферометрии, а также рассматривается DInSAR, применяемый в данной работе для оценки смещений земной поверхности.

На рисунке 1 показана типичная геометрия РСА-визуализации: датчик установлен на движущейся платформе и, соответственно, электромагнитные волны последовательно передаются, а отраженные рассеянные эхо-сигналы собираются радиолокационной антенной в разные места из-за движения этой платформы; соответствующая когерентная комбинация принятых сигналов позволяет построить виртуальную апертуру, которая намного длиннее длины физической антенны («синтезированная апертура»).

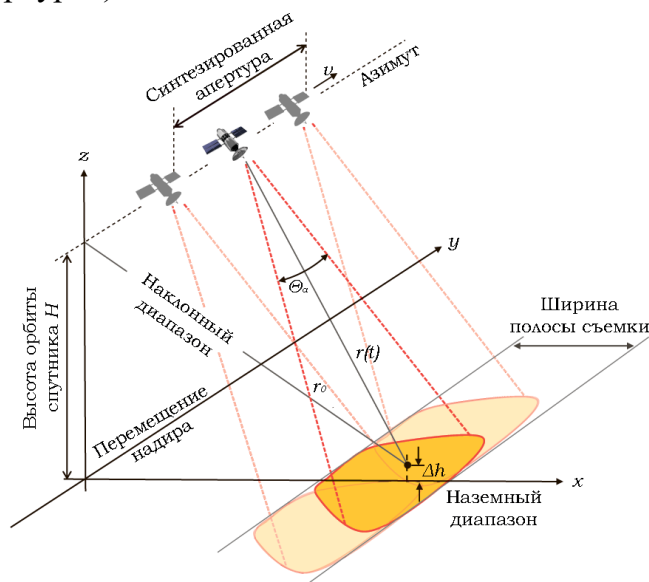


Рисунок 1 – Иллюстрация геометрии РСА-визуализации [Moreira et al., 2013]

В случае РСА радарное изображение представляет собой меру отражательной способности места съемки с учетом вклада всевозможных «шумов», влияющих на качество снимка. Спутниковые РСА-снимки имеют широкий спектр применения, в частности они используются для построения цифровых моделей рельефа (ЦМР), оценки смещений земной поверхности и техногенных объектов. Радиолокационные

изображения для РСА-интерферометрии обычно получают либо с локально параллельных орбит (траекторий) полета, либо с одной и той же орбиты полета, но в разное время. Первый способ известен как межсетевая интерферометрия и делает возможным, помимо ряда других применений, точное измерение топографии поверхности. Вторым известен как парная или дифференциальная интерферометрия (DInSAR), описание которой подробно приводится в разделе 1.3.

Для корректной интерпретации результатов необходимо привлекать информацию об изучаемом объекте и возможных причинах смещений. Спутниковая интерферометрия существенно сокращает расходы на проведение мониторинга, особенно в труднодоступных районах. Комплексирование с данными наземных наблюдений позволяет повысить надежность получаемых результатов [Михайлов и др., 2016].

В основе дифференциальной интерферометрии лежит сравнение фазы отраженных сигналов при съемке первого и второго снимка. Если отражающие объекты на поверхности Земли меняют свое взаимное положение за временной период между двумя РСА-съемками (как это происходит в случае землетрясения, проседания грунта, оползня и др. процессов), то после построения интерферограммы по паре снимков в интерферометрической фазе появляется новая аддитивная фазовая составляющая, не зависящая от базовой линии. В результате фазовый сдвиг содержит как составляющую, связанную с высотой отражающего объекта, так и компоненту, отражающую смещения в направлении LOS.

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 (полученная фаза ϕ содержит вклады от нескольких факторов, в частности фазу кривизны Земли ϕ_{flat} топографическую фазу земной поверхности ϕ_{DEM} , возможное смещение на поверхности ϕ_{disp} , которое произошло между двумя измерениями, атмосферные условия ϕ_{atm} и другие шумы ϕ_{noise}) и построение карты их когерентности, последующее вычитание синтетической интерферограммы (в результате должна превалировать компонента ϕ_{disp}), применение фазовых фильтров, вычисление абсолютных значений фаз (развертка фаз) и их преобразование в абсолютные значения высот / смещений вдоль LOS и геокодирование.

Выводы по главе 1. При построении дифференциальной интерферограммы в каждом конкретном случае приходится подбирать оптимальные параметры для каждого шага обработки снимков. Важным условием является исходное качество отобранных снимков. Далее, путем экспертной оценки проверяя качество процесса на каждом этапе, принимаются решения об изменении тех или иных параметров, о необходимости фильтрации и т.д. Таким образом, параметры метода нельзя считать унифицированными для исследований в районе полуострова Камчатка и Командорских островов. Здесь

очевидна важная роль исследователя, способного оптимальным образом адаптировать метод дифференциальной интерферометрии для требуемой оценки полей смещений.

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-1В для островов Беринга и Медный.

Изучение данного землетрясения интересно в частности тем, что оно произошло в зоне сочленения трех тектонических плит: Тихоокеанской, Охотоморской и Берингии [Ландер и др., 1994; Maskey et al., 1997; Гордеев и др., 2015]. Исследование механизмов очагов землетрясений на периферии плиты Берингия, в том числе методами спутниковой радарной интерферометрии (см. например, [Михайлов и др., 2018]), важно для проверки гипотезы о существовании этой микроплиты.

В разделе 2.1 описывается получение оценки полей смещений земной поверхности вследствие БАЗ методами РСА-интерферометрии. В данном исследовании были отобраны снимки, выполненные спутником Sentinel-1В с 118 трека нисходящей орбиты. Период съемки охватывал во времени само событие, его ближайший форшок (17.07.2017 с $M_w=6.3$) и основные афтершоки (18.07.2017 с $M_w=5.2$ и 28.07.2017 с $M_w=5.6$). За период с 17 июня 2017 г. по 28 августа 2017 г. из архивов ESA получено 7 снимков. Обработка снимков производилась методом DInSAR с использованием открытого программного пакета SNAP с встроенным программным модулем (плагином) SNAPHU, реализующим алгоритм развертывания фазы. Дифференциальные интерферограммы всех пар снимков показали высокую когерентность в области островов Беринга и Медный (более 0.7), что свидетельствует о высоком качестве корегистрации снимков. Интерферограмма пары снимков от 11.07.2017 и 23.07.2017 (рисунок 2) выявила наиболее четкие смещения в направлении на спутник от 22 до 37 см на о. Медный и от 72 до 74 см на о. Беринга (рисунок 3). Смещения содержат небольшую часть постсейсмических движений, произошедших за 6 дней после БАЗ.

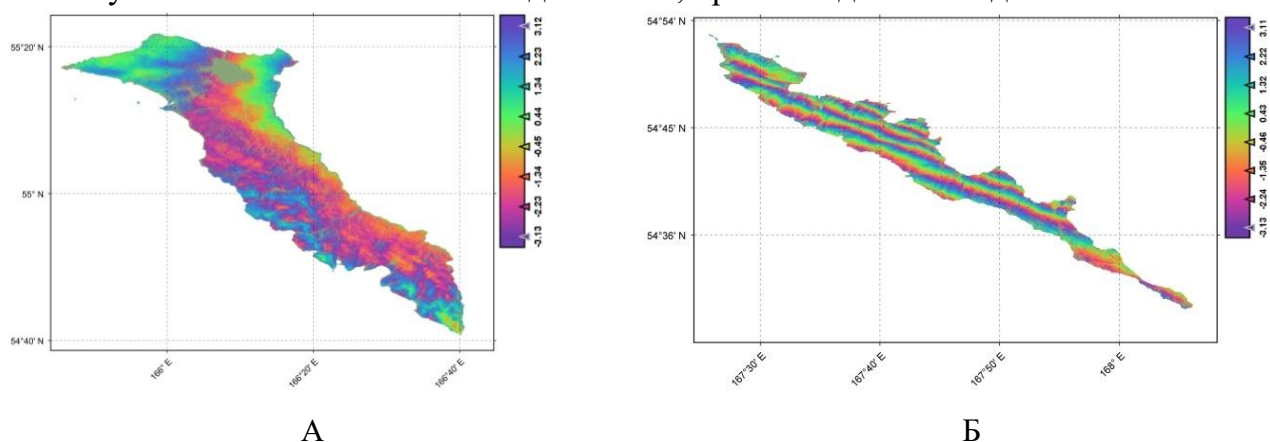


Рисунок 2 – Интерферограмма (неразвернутая фаза), полученная по паре снимков от 11.07.2017 и 23.07.2017. Интервал изменения от $-\pi$ до π . А – о. Беринга, Б – о. Медный

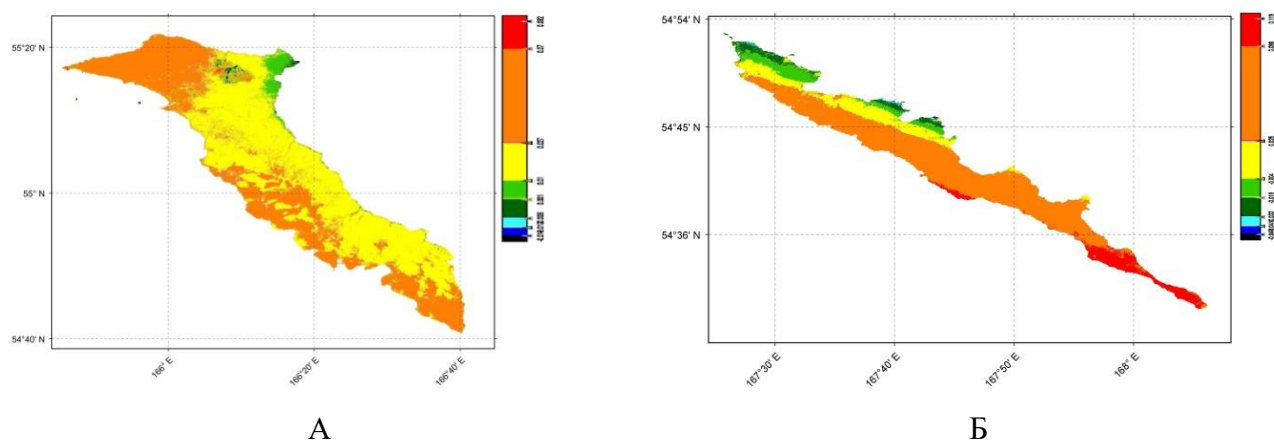


Рисунок 3 – Поля смещений (развернутая фаза), полученные по паре снимков от 11.07.2017 и 23.07.2017 в долях метра. А – о. Беринга, Б – о. Медный.
Поля смещений приведены к нулевому среднему

В разделе 2.2 проведен обзор существующих моделей поверхности разрыва БАЗ. Все проведенные ранее исследования механизма БАЗ [Лутиков и др., 2019; Рогожин и др., 2019; Lay et al., 2017; Чебров и др., 2019] показывают, что в результате землетрясения произошел практически чистый правосторонний сдвиг по разлому Беринга.

В нашей работе при построении модели поверхности разрыва использованы данные о косейсмических смещениях с 26 пунктов GPS, опубликованные в работе [Чебров и др., 2019] и данные о поле смещений на островах Беринга и Медный, полученные методами спутниковой радарной интерферометрии (рисунок 3).

В разделе 2.3 обсуждается метод построения модели поверхности сейсмического разрыва. Для описания сейсмического события поверхность разрыва обычно аппроксимируют набором прямоугольных площадок и применяют аналитическое решение для смещений по падению и простиранию на площадке (прямоугольном разрезе) в упругой среде. Для относительно небольших событий чаще всего используется решение для однородного упругого полупространства [Okada, 1985, 1992]. Для крупных землетрясений рекомендуется использовать решение Ф. Поллитца [Pollitz, 1996, 1997], построенное для радиально расслоенной сферической модели Земли. Согласно [Pollitz, 1996, 1997] решение уравнений статического равновесия представляется в виде суперпозиции сфероидальных и тороидальных компонент, каждая из которых зависит от тензора момента и степени сферической гармоники. Для источника в виде точечной дислокации в явном виде можно выписать функцию Грина и проинтегрировать ее затем по прямоугольной площадке. При сравнении деформаций, рассчитанных для сферически однородной и сферически расслоенной Земли, показано, что игнорирование ее слоистости приводит к ошибкам до 20 % [Pollitz, 1996, 1997]. Наибольшим образом влияние расслоенности проявляется при наличии большой сдвиговой компоненты. Тем самым, использование модели Ф. Поллитца для построения решения для БАЗ считаем вполне рациональным.

В нашем исследовании задача решалась в следующей постановке. Пусть для области землетрясения имеются интерферометрические данные о смещениях в направлении на спутник LOS: $W_{los}(\varphi_i, \lambda_i)$. Пусть также имеются данные GPS в некоторой системе пунктов повторных наблюдений, характеризующие горизонтальные косейсмические смещения на север и восток $\{V_{north}(\varphi_j, \lambda_j), V_{east}(\varphi_j, \lambda_j)\}$. Вертикальные смещения по данным GPS обычно менее точны, поэтому, как и в работе [Lay et al, 2017], нами они не использовались. Аппроксимируем поверхность разрыва одной прямоугольной областью. Ее размеры и положение определяются семью параметрами: широта, долгота и глубина одного из ее углов, углы падения и простирания, размеры вдоль падения и простирания. Данные сейсмологии дают две нодальные плоскости и направление подвижки. Отсюда могут быть получены углы простирания и падения прямоугольной области. Линейные размеры области и ее пространственное положение уточняются методом подбора с учетом положения эпицентра землетрясения и облака афтершоков, тектонических данных.

Разделяем область на ряд прямоугольных элементов по падению и простиранию. Компоненты вектора смещений в каждом элементе по падению и простиранию D_i и S_i являются неизвестным. Эти параметры входят в уравнения изотропной упругой среды линейно: сумма решений от набора плоскостей равна сумме решений от каждой плоскости, поэтому смещения на элементах, аппроксимирующих поверхность разрыва, находятся путем решения соответствующей линейной обратной задачи.

Важным ограничением на получаемые решения является условие на направление подвижки $rake_i = tg(D_i/S_i)$. Включение в функционал обратной задачи условия близости угла подвижки к углу, определенному по данным сейсмологии, делает задачу нелинейной и сводит ее решение к перебору по всем допустимым углам. Для сохранения линейности обратной задачи аналогично работам [Михайлов и др., 2019, Diament et al., 2020] была использована следующая форма регуляризирующего функционала обратной задачи в евклидовой метрике L_2 :

$$\begin{aligned} & \left\| \sum_{j=1}^{N_1} (U_{LOS,j} - \sum_{i=1}^K (D_i \cdot u_{i,j}^d + S_i \cdot u_{i,j}^s)) - A \right\|_{L_2} + \left\| \sum_{j=1}^{N_2} (U_{LOS,j} - \sum_{i=1}^K (D_i \cdot u_{i,j}^d + \right. \\ & S_i \cdot u_{i,j}^s)) - B \left\|_{L_2} + \alpha \left(\left\| \sum_{j=1}^M (N_{GPS,j} - \sum_{i=1}^K (D_i \cdot n_{i,j}^d + S_i \cdot n_{i,j}^s)) - B \right\|_{L_2} + \left\| \sum_{j=1}^M (E_{GPS,j} - \right. \right. \\ & \left. \left. \sum_{i=1}^K (D_i \cdot e_{i,j}^d + S_i \cdot e_{i,j}^s)) \right\|_{L_2} \right) + \beta \left\| \sum_{i=1}^K (D_i \cos(rake) - S_i \sin(rake)) \right\|_{L_2} + \gamma \left(\left\| \sum_{i=1}^K (D_i - \right. \right. \\ & \left. \left. \bar{D}) \right\|_{L_2} + \left\| \sum_{i=1}^K (S_i - \bar{S}) \right\|_{L_2} \right) = \min. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь исходные данные: $U_{LOS,j}$ – значения смещений в направлении на спутник по данным РСА-интерферометрии в N_1 точках на острове Беринга и в N_2 точках на о. Медный, $N_{GPS,j}$ и $E_{GPS,j}$ – смещения на север и восток в M пунктах GPS. Неизвестные величины: D_i и S_i – смещения по падению и простиранию на K элементах разбиения поверхности разрыва и две константы A и B , определяющие возникший при развертке фазы сдвиг полей смещений на островах Беринга и Медный. Расчетные величины: $u_{i,j}^d$ и $u_{i,j}^s$ – смещения в направлении на спутник, рассчитанные от единичного смещения по

падению (d) и простиранию (s) на элементе i в точку задания РСА-данных с индексом j . Аналогично $n_{i,j}^d$ и $n_{i,j}^s$ ($e_{i,j}^d$ и $e_{i,j}^s$) смещения на север (восток) на пункте GPS j в результате единичного смещения по падению и простиранию на элементе i . Параметр α учитывает различный уровень точности интерферометрических и GPS данных; параметры β и γ определяет вес условия на угол подвижки. Условие при коэффициенте β требует, чтобы угол подвижки был близок к заданному направлению подвижки *rake* (в данном случае мы использовали условие близости подвижки к чистому сдвигу). Однако этому условию соответствуют два угла, различающиеся на 180° . Поэтому, если в решении возникают смещения в противоположных направлениях, что не соответствует физическим представлениям, увеличивается коэффициент γ при условии, что среднее смещения в направлении простирания и падения по отдельности должны быть близки к своим средним значениям. Практика показывает, что это условие эффективно устраняет смещения в противоположных направлениях.

Дифференцируя (1) по неизвестным величинам A и B , находим значения этих констант (например, для A):

$$A = \frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} U_{LOS,j} - \sum_{i=1}^K \left(D_i \cdot \frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} u_{i,j}^d + S_i \cdot \frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} u_{i,j}^s \right). \quad (2)$$

Следовательно, до решения обратной задачи следует из смещений U_{LOS} , вычесть средние смещения, вычисленные отдельно для о. Беринга и о. Медный, и в процессе вычисления функций Грина u^d и u^s также вычитать их средние по каждому острову. После нахождения неизвестных смещений D_i и S_i , могут быть вычислены и константы A и B .

Раздел 2.4 посвящен построению новой модели поверхности разрыва БАЗ по данным РСА-интерферометрии. В ближней зоне землетрясения располагается всего две станции, которые не обеспечивают достаточного контроля моделей поверхности разрыва. Поэтому вначале мы численно проверили согласованность данных РСА-интерферометрии и спутниковой геодезии, а также протестировали гипотезу о том, что сейсмический очаг состоял из двух разрозненных разрывов [Модель Геологической службы США; Lay et al., 2017; Чебров и др., 2019]. Показано, что модель единого очага хорошо согласуется с данными РСА-интерферометрии, а модель составного очага по характеристике изолиний смещений на островах Беринга и Медный противоречит данным РСА-интерферометрии.

Далее было выполнено формальное решение обратной задачи с заданием смещений на 26 пунктах GPS, опубликованных в работе [Чебров и др., 2019] и полученных нами смещений по данным РСА-интерферометрии. В построенных моделях область сейсмического разрыва аппроксимирована плоскостью протяженностью по простиранию 370 км, по падению 18 км. Рассчитаны три модели: однородного смещения по всей поверхности разрыва, модель, в которой поверхность разрыва разделена на пять элементов по простиранию, и модель, разделенная на четыре элемента по простиранию и два уровня по падению, всего восемь элементов (рисунок 4). Во всех моделях получен одинаковый тип смещений – правый сдвиг с относительно небольшой надвиговой

компонентой. Согласно построенным моделям в некоторых областях поверхности разрыва смещения, возможно, были несколько меньше средних величин, но в целом смещения произошли по всей очаговой области.

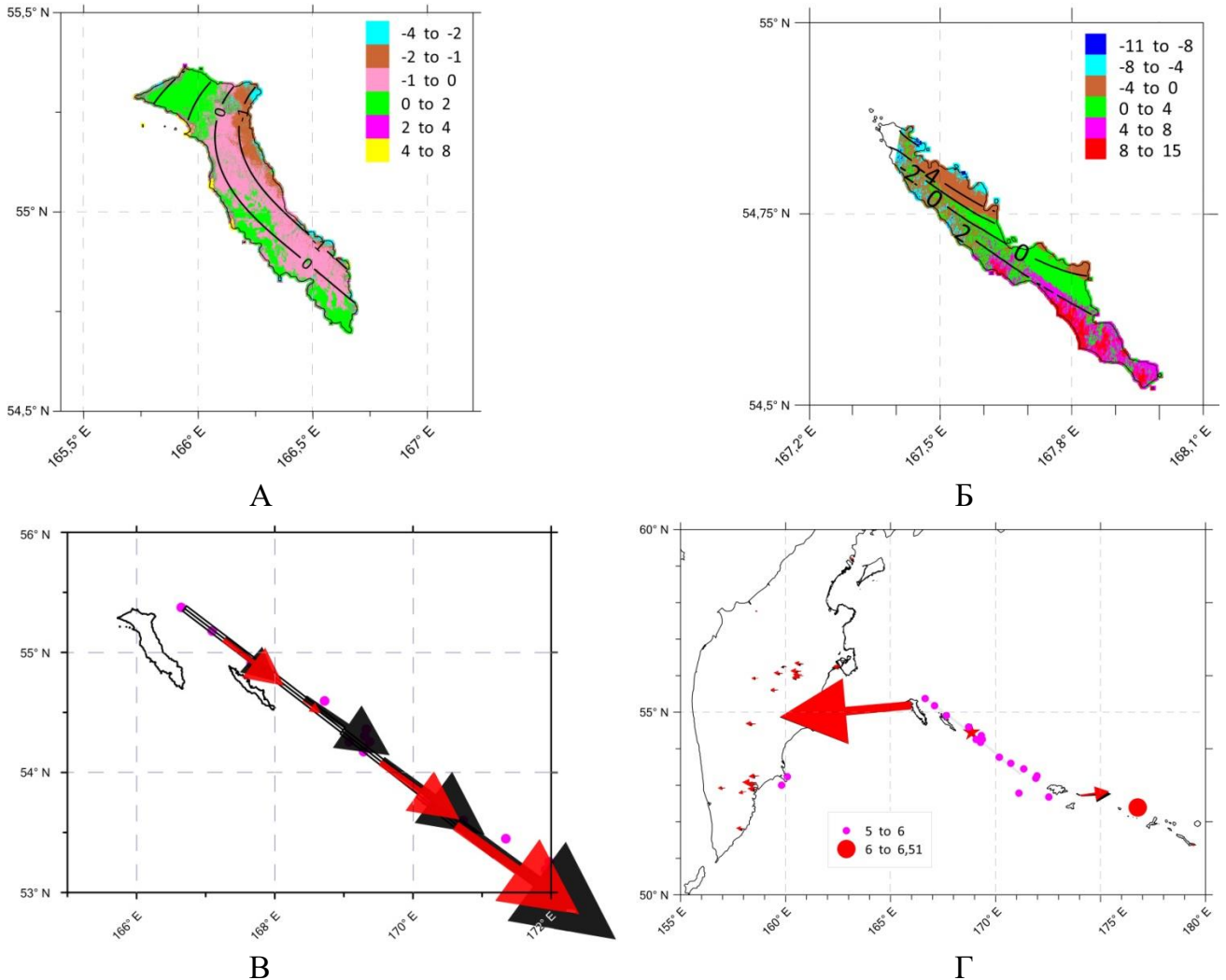


Рисунок 4 – Модель очага БАЗ, состоящая из прямоугольного разрыва длиной по простиранию 370 км, разделенного на четыре равных элемента по простиранию и два по падению. А – смещения (в см) в направлении на спутник на о. Беринга. Цветовая шкала – РСА-данные, изолинии – полученной решение. Б – то же на о. Медный. В – модель поверхности разрыва. Красные стрелки – смещения на глубоких элементах, черные – на более мелких. Г – сравнение смещений на пунктах GPS (красные стрелки – расчетные, черные – измеренные). Пурпурные точки – основные афтершоки по данным сайта Геологической службы США (<https://www.usgs.gov>), красная звезда – эпицентр землетрясения. Максимальный размер стрелки соответствует смещению в 7.19 см (о. Беринга)

При этом оцененный по нашей модели размер разрыва (так же, как и размеры разрыва в других моделях очага БАЗ), превосходит средний размер, даваемый статистическими соотношениями для землетрясения $M_w=7.6$ [Thingbaijam et al., 2017]. Согласно построенной модели смещения на поверхности разрыва происходили

неравномерно, особенно по глубине, но полностью запертых участков, по всей вероятности, все же не осталось.

Выводы по главе 2. 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.

Расхождение моделей, построенных на основе различных данных, может быть связано со следующим обстоятельством. Данные сейсмологии характеризуют часть очагового процесса, сопровождающегося генерацией сейсмических волн. Оценки смещений земной поверхности, полученные по данным ГНСС и РСА-интерферометрии, характеризуют смещения, происходящие, в том числе, и в асейсмическом режиме. Используемые нами радиолокационные снимки включали не только главное событие, но и его форшоки, магнитудой до 6.3, а также значительную часть афтершоков, магнитудой до 5.6. Поэтому полученные в наших моделях смещения более равномерно распределены по площади 370-ти километровой поверхности разрыва, в отличие от моделей, построенных по анализу волновых форм.

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 магнитудой $M_w=6.6$. Данные о параметрах землетрясения в различных мировых обрабатывающих центрах разнятся. По сведениям NEIC эпицентр землетрясения расположен в 81 км от пос. Усть-Камчатск (56.940°N 162.786°E), глубина составила 17 км. В Гарвардском каталоге GCMТ указаны иные координаты эпицентра – 57.00°N 163.15°E , глубина центроида 17 км. Согласно данным КФ ФИЦ ЕГС РАН [Чебров и др., 2017], гипоцентр землетрясения находился примерно в 90 км к северо-востоку от Усть-Камчатска на глубине ~43 км и имел координаты 57.0°N 163.2°E , т.е. эпицентральная область, очерченная афтершоками, располагалась в южной части залива Озерной.

Определение косейсмических смещений ЮОЗ по данным стационарных пунктов ГНСС оказалось невозможным. В силу удаленности ближайших пунктов от эпицентра события, смещения на них оказались на уровне шумов. 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, а также уточнить положение гипоцентра землетрясения.

В разделе 3.1 приводится краткий очерк исторической сейсмичности в районе залива Озерной в западной части Берингова моря у северо-восточного побережья Камчатки, в тылу Алеутской островной дуги. С начала XX века до изучаемого ЮОЗ здесь было зафиксировано лишь три сильных землетрясения: 15 апреля 1945 года ($M_w = 7.1$, глубина 35 км), 25 октября 1945 года ($M_w = 6.5$, глубина 15 км) и самое сильное из них – 23 ноября 1969 года ($M_w = 7.4$, глубина 35 км).

В разделе 3.2 обсуждаются параметры ЮОЗ по данным сейсмических станций РИОЦ «Петропавловск», USGS и GCMT. Согласно данным РИОЦ «Петропавловск», ЮОЗ и его афтершоки произошли под акваторией залива Озерной [Чебров и др., 2017], то есть эпицентр землетрясения располагается восточнее, чем показали расчеты USGS и GCMT, использовавших преимущественно удаленные от Камчатки станции. Отмечается, что координаты землетрясений, полученные в РИОЦ «Петропавловск», находятся в согласии со значениями азимутов, рассчитанных независимыми методами, что позволяет рассматривать их в качестве наиболее достоверных.

Также в [Чебров и др., 2017] формально оценена длина очага ЮОЗ равная 25 км, ширина – 17 км. За почти четыре месяца после землетрясения в очаговой области ЮОЗ зарегистрировано 440 афтершоков с энергетическим классом K_s от 5.8 до 12.5, более 40% из которых произошло за первые сутки после главного толчка. Отмечается, что практически все афтершоки ЮОЗ произошли в пределах южной части облака афтершоков Озерновского землетрясения 1969 года. Ось растяжения сброшенных напряжений механизма очага субвертикальна, а ось сжатия – субгоризонтальна и ориентирована вдоль направления юго-восток – северо-запад. Тип движения по обеим возможным плоскостям – преимущественно взброс.

В пользу гипотезы о принадлежности ЮОЗ к процессам, порожденным коллизией микроплиты Берингия [Гордеев и др., 2015] с Охотоморской плитой, говорит не только географическое положение, но и хорошее соответствие механизмов главного события и его афтершоков всем ранее известным оценкам для землетрясений южной части Корякского пояса.

В разделе 3.3 проводится оценка смещений земной поверхности вследствие ЮОЗ по данным РСА-интерферометрии с применением метода DInSAR. Для выявления возможных смещений были отобраны снимки спутниковой миссии ESA Sentinel-1A, а также снимки миссии JAXA ALOS-2. При расчетах использовались программные пакеты ENVI SARscape и SNAP со встроенным плагином развертки фазы SNAPHU.

Были проанализированы все возможные пары изображений, охватывающие исследуемое сейсмическое событие (всего 50 пар). Только в четырех парах снимков были выявлены смещения в направлении LOS.

По снимкам со спутника Sentinel-1A единственная интерферограмма, показавшая смещения на земной поверхности, получена по паре снимков, от 17 марта 2017 г. и 29 марта 2017 г. (рисунок 5). Все остальные построенные интерферограммы никаких смещений не показали из-за потери когерентности снимков. Важно отметить, что

снимок от 29 марта 2017 г. сделан через 15 часов после землетрясения. Максимальные смещения в проекции на LOS составили до 13 см за период 17.03.2017 – 29.03.2017. Аналогичные результаты также были независимо получены в работе [Vassileva et al., 2020].

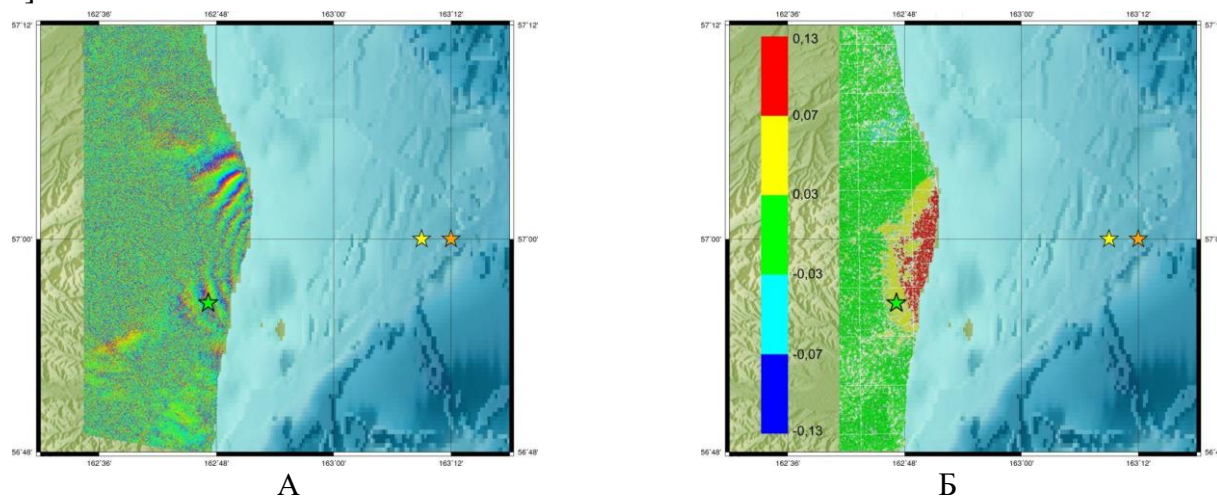


Рисунок 5 – Оценка смещений в результате ЮОЗ по паре снимков спутника Sentinel-1A от 17.03.2017 и 29.03.2017 (89 трек нисходящей орбиты): А – дифференциальная интерферограмма (неразвернутая фаза в радианах), Б – смещение на земной поверхности после развертки фазы (в метрах). Красным и желтым цветом обозначаются положительные смещения (в направлении на спутник), синим и голубым – отрицательные (в направлении от спутника). Зеленая звезда – эпицентр ЮОЗ по данным NEIC, желтая – по данным GCMT, оранжевая – по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН

Для верификации полученных результатов были построены парные интерферограммы для снимков со спутника ALOS-2 (рисунок б), который оборудован РСА-датчиком с существенно бóльшей длиной волны. Снимки L-диапазона сохраняют когерентность на длительных интервалах времени. Они менее чувствительны к атмосферным помехам, а также возможным помехам вследствие рыхлого снежного покрова на земной поверхности. Интерферограммы как с нисходящей, так и с восходящей орбит определили смещения в направлении на спутник, причем намного бóльшие по значению, чем по снимкам Sentinel-1A.

Максимальное смещение в направлении LOS по снимкам ALOS-2 с нисходящего 9 трека равно 24.7 см, с восходящего 108 трека – 33.1 см. Это близкие величины. Расхождения могут быть связаны с тем, что пара снимков с 9 трека захватывает один месяц после землетрясения, а пара со 108 трека – почти четыре месяца, т.е. весь афтершоковый период. Для спутника Sentinel-1A с нисходящего 89 трека смещения существенно меньше, всего 13 см. Учитывая близость геометрии съемки обоих спутников, такого существенного расхождения в значениях быть не должно. На этом основании убеждаемся в нашем предположении о наличии в изучаемом районе мощного и неоднородного слоя снега в большую часть периода съемки, сильно рассеивающего сигнал РСА-датчика Sentinel-1A. Судя по всему, отражения сигнала получены не от земной поверхности, которая, безусловно, сместилась, а представляют собой либо

рефракцию в толще снегового покрова, либо отражения от прослоев твердого наста. Принимая во внимание то, что многочисленные пары Sentinel-1A не выявили никаких смещений, мы использовали смещения по единственной паре Sentinel-1A (17.03.2017 – 29.03.2017) только для сравнения.

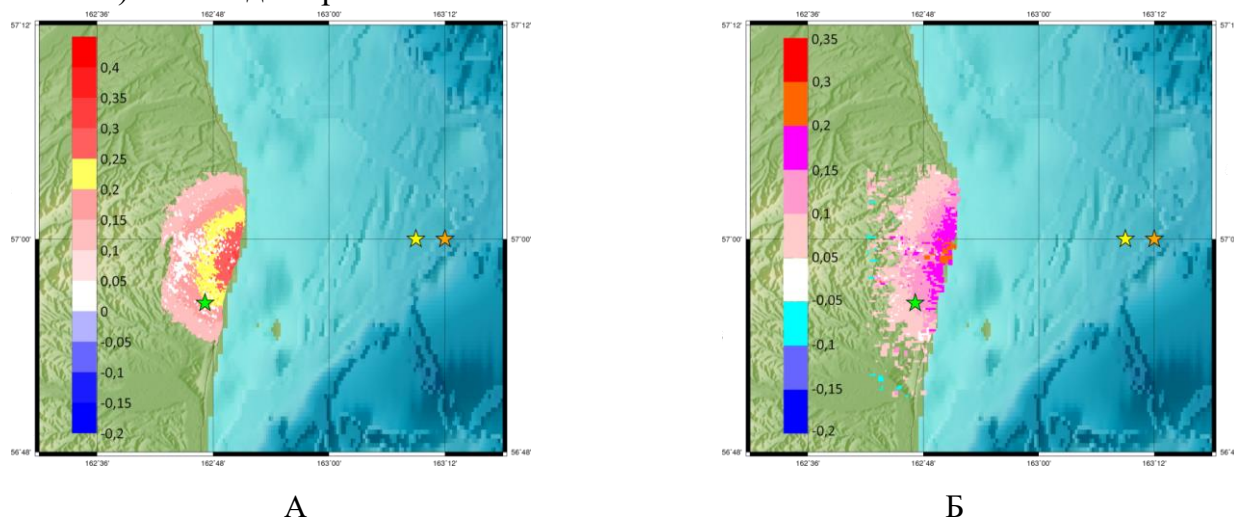


Рисунок 6 – Поля смещений по данным ALOS-2 (в метрах): А – по снимкам 108 трека восходящей орбиты, Б – по снимкам 9 трека нисходящей орбиты. Обозначения эпицентров те же, что на рисунке 5

Раздел 3.4 посвящен построению новой модели поверхности разрыва ЮОЗ на основе данных РСА-интерферометрии. Постановка задачи аналогична рассмотренной в главе 2. Учитывая, что косейсмические смещения ЮОЗ по временным рядам GPS наблюдений в рассматриваемой нами области не определялись, решение выполнено только по данным РСА-интерферометрии. Для ЮОЗ получаем следующую форму регуляризирующего функционала обратной задачи в евклидовой метрике L_2 :

$$\left\| \sum_{j=1}^N \left(U_{LOS,j} - \sum_{i=1}^K (D_i \cdot u_{i,j}^d + S_i \cdot u_{i,j}^s) \right) - A \right\|_{L_2} + \beta \left\| \sum_{i=1}^K (D_i \cos(rake) - S_i \sin(rake)) \right\|_{L_2} + \gamma (\| \sum_{i=1}^K (D_i - \bar{D}) \|_{L_2} + \| \sum_{i=1}^K (S_i - \bar{S}) \|_{L_2}) = \min. \quad (3)$$

Принимаем глубину нижней кромки равной 12.43 км, верхней – 3.8 км (аналогично [Vassileva et al., 2020]), угол падения 51° (USGS), координаты центра плоскости (56.9654°N , 162.9°E), длину по простиранию 12.9 км, по падению – 9.1 км. Нами была выполнена большая серия расчетов, с различным углом падения поверхности разрыва и различными углами простирания. Наилучший результат получен для поверхности, разделенной на 4 равных элемента – два по простиранию и два по падению, с углом простирания 213° , т.е. плоскость наклонена на северо-запад. Решение строилось под поля смещений, полученные по снимкам с восходящей и нисходящей орбит спутника ALOS-2. Дополнительно введено условие регуляризации, состоявшее в том, что угол подвижки близок к значению, заданному по сейсмологическим данным [Михайлов и др., 2019, 2022; Diament et al., 2020], равному 102° (первая нодальная плоскость по данным GCMT). Сейсмический момент оценен как $6.6 \cdot 10^{18}$ Н*м,

среднеквадратическая невязка подбора – 2.9 см. Визуализация результатов показана на рисунке 7.

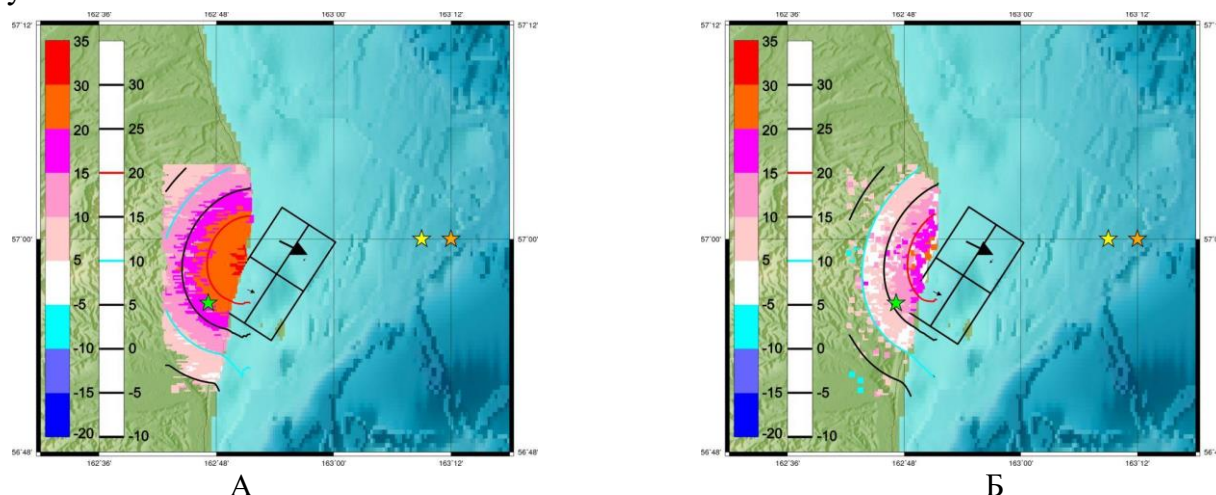


Рисунок 7 – Результаты подбора моделью с одной плоскостью, разделенной на 4 равных элемента, и условием, что вектор подвижки близок к GCMТ решению (102°). Прямоугольник – проекция плоскости на дневную поверхность, цветная шкала – исходные смещения в направлении LOS, изолинии – поле смещений по модели, также в направлении LOS соответствующего спутника, стрелки – направление смещений на верхней поверхности разрыва. А – сравнение результатов со смещениями на восходящем треке ALOS-2. Б – то же для нисходящего трека ALOS-2. Смещения на верхних (справа) элементах близки к нулю. Обозначения эпицентров те же, что и на рисунках 5-6.

Выводы по главе 3. Для ЮОЗ нам удалось построить наиболее детальную дифференциальную интерферограмму по снимкам спутника ALOS-2 со 108 трека восходящей орбиты. Эта интерферограмма получена впервые и подробно характеризует поле смещений.

Следует отметить, что для исследования использованы, в основном, летние снимки ALOS-2, взят только один снимок за март. Это позволяет быть уверенными в снижении влияния снежного покрова на качество интерферограммы. При этом смещения по снимкам ALOS-2 согласуются между собой, что показывает возможность использования с определенной осторожностью «зимних» снимков ALOS-2 для Камчатки. В то же время, поле смещений, полученное по снимкам спутника Sentinel-1A, имеет в два с лишним раза меньшую амплитуду. Важно, что ни один соседний по времени снимок, а также летние снимки не дали положительного результата. Поэтому, использовать снимки спутника Sentinel-1A в условиях Камчатки в районах с развитым снежным покровом не рекомендуется.

В данной работе построена модель поверхности разрыва с заданными начальными параметрами и условием близости угла подвижки к данным GCMТ решения. Решение дает оценку сейсмического момента близкую к сейсмологическим данным. Основываясь на результатах моделирования, угол падения поверхности разрыва равен 51° , что существенно отличается от крутого падения (72°) в модели [Vassileva et al., 2020].

Кроме того, проанализировано утверждение работы [Чебров и др., 2017] о том, что эпицентр ЮОЗ располагался северо-восточнее, чем это представлено в каталоге NEIC. В этом случае аппроксимирующая плоскость должна быть сдвинута на восток, но тогда существенно возрастет ошибка подбора и амплитуда смещений, т.е. не будет совпадения по сейсмическому моменту. Ширина поля смещений также не позволяет сильно сдвигать модель на восток. Отсюда заключаем, что разрыв произошел ближе к берегу.

Подвижка в очаге по данным моделирования, как и по данным сейсмологии, это пологий (51°) надвиг с небольшой правосторонней сдвиговой компонентой. Смещения в очагах предыдущих землетрясений, эпицентры которых расположены восточнее, предположительно были почти чистым сдвигом на близвертикальных разрывах. Такое расхождение указывает на то, что возможно разрыв ЮОЗ произошел на иной системе разломов, связанной с береговыми горными хребтами.

Глава 4. Оценка возможности извержения вулкана Большая Удина. Описывается исследование сейсмической активности в районе вулкана Большая Удина (Б. Удина), наблюдавшейся с конца 2017 г., проведенное совместно с коллегами из Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН. На основе анализа сейсмических и спутниковых данных предлагается альтернативная 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 приводятся оценки смещений земной поверхности в районе вулкана по спутниковым данным. Нами использовалось решение Моги для оценки размера области смещений на земной поверхности в зависимости от глубины магматической камеры. Если известен коэффициент Пуассона, то смещения на поверхности зависят только от глубины камеры (формулы (2) в [Bonafede and Ferrari, 2009]). В случае если смещения земной поверхности вызваны изменением давления в магматической камере на глубине 5 км, то ширина области смещений по изолинии 0.5 максимума составит 7.7 км, а по изолинии 0.2 максимума около 14 км.

Для анализа смещений поверхности на склонах вулкана за 2017 и 2018 гг. были использованы снимки со спутника Sentinel-1A, выполненные с нисходящей орбиты 60 трека. За период с 07.06.2017 по 23.09.2017 в архивах ESA найдено 10 снимков, а за период с 21.05.2018 по 30.09.2018 – 12 снимков. В данном исследовании нами был применен метод малых базовых линий (SBAS), который эффективен при анализе смещений устойчиво отражающих площадок на природных объектах. Для этого на первом шаге по парам снимков были построены интерферограммы, а далее был выполнен поиск устойчивых отражателей на склонах вулкана. Анализ проводился для 2017 г. и 2018 г. отдельно, с использованием программного пакета ENVI SARscape.

По указанным снимкам устойчивые отражатели обнаружены в основном на нижнем ярусе вулкана Б. Удина (рисунок 8). Анализ временных серий смещений показал, что характер смещений на юго-западном и восточном склонах практически не изменился – совпадает и расположение областей максимальных смещений, и временные серии для областей А и В на рисунке 9. Отмечается небольшое увеличение средних

скоростей смещений в 2018 г., но знак смещений не меняется и за период съемки суммарные смещения не превосходят 15-20 мм. На северно-западном склоне средние скорости смещений изменились: в 2017 г. наблюдались небольшие смещения к спутнику, а в 2018 г. скорости смещений близки к нулю (временные серии для области С на рисунке 9).

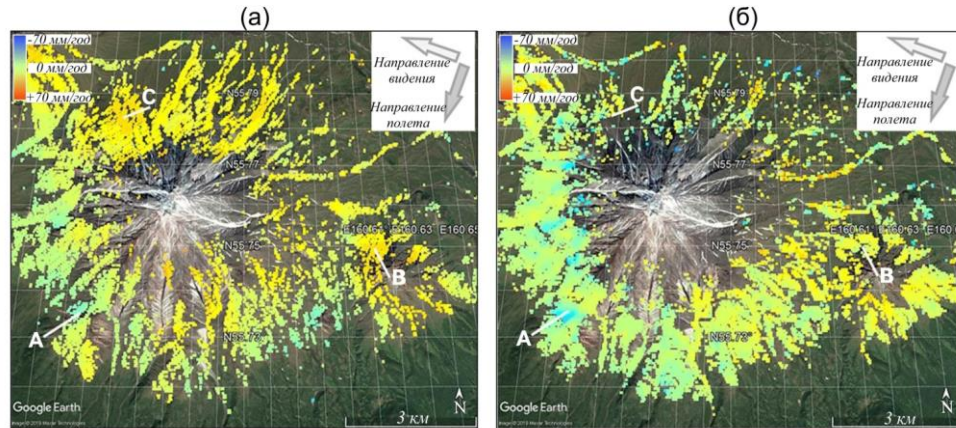


Рисунок 8 – Положение устойчивых отражателей на склонах вулкана Б. Удина: период съемки 07.06.2017 – 23.09.2017 (а); период съемки 21.05.2018 – 30.09.2018 (б). В качестве топографической основы рисунков использован снимок с сайта Google Earth.

Цветовая шкала в верхнем левом углу – средние скорости смещений от +70 до -70 мм/год. Устойчивые отражатели синего цвета смещаются в направлении от спутника. Направление полета и направление видения показаны в правом верхнем углу стрелками

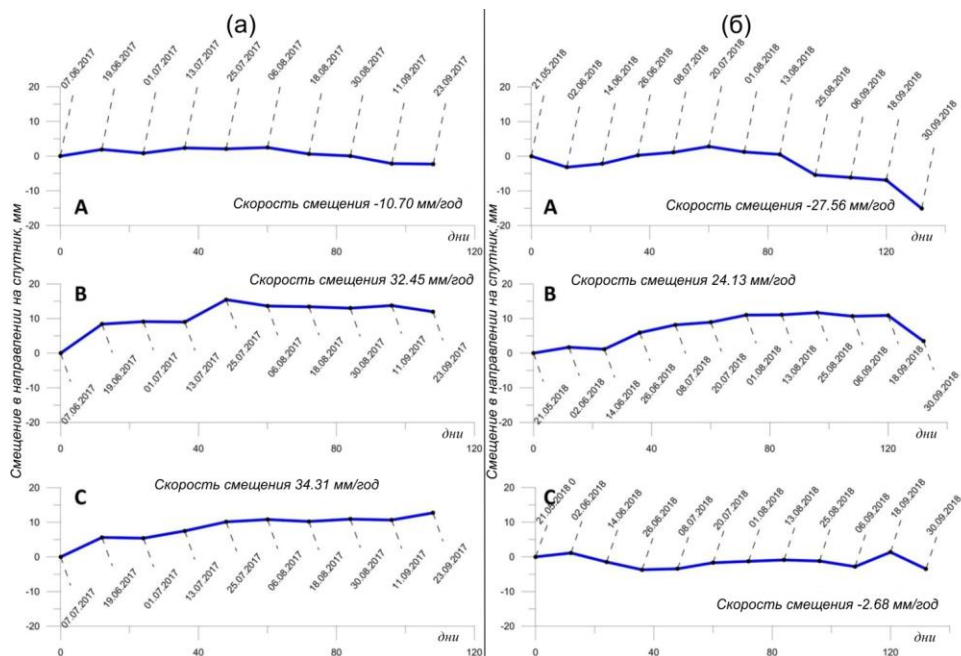


Рисунок 9 – Временные серии смещений устойчиво отражающих площадок на склонах вулкана Б. Удина: период съемки 07.06.2017 – 23.09.2017 (а); период съемки 21.05.2018 – 30.09.2018 (б). Положение областей, обозначенных индексами А, В, С, показано на рисунке 4.1. Горизонтальная шкала – время съемки, вертикальная – смещения в направлении на спутник в мм

Полученные результаты показывают, что существенных смещений в периоды спутниковой радарной съемки в 2017 и 2018 годах на склонах вулкана Б. Удина не наблюдалось. Это обычно указывает либо на малую активность глубинных процессов, либо, что более вероятно в данном случае, на то, что вызвавшие повышенную сейсмическую активность процессы, происходили на большой глубине.

Радарную съемку исследуемой области проводил также спутник Японского космического агентства ALOS-2. Длинноволновое излучение менее чувствительно к атмосферным помехам, проникает через растительность и не слишком глубокий снег, поэтому эти снимки более предпочтительны при оценке смещений на природных ландшафтах. В то же время, чем больше длина волны, тем хуже разрешение на местности (больше размер пикселя) и ниже точность оценки смещений. Действительно, одному и тому же фазовому сдвигу на интерферограмме, полученной по снимкам ALOS-2, соответствует в 4 раза большее смещение, чем на интерферограмме, полученной по снимкам спутников Sentinel-1A. Кроме того, спутник ALOS-2 снимает Камчатку значительно реже. За период 2016 – 2018 годов на район исследований выполнено 5 снимков, из которых для построения парных интерферограмм удалось использовать три снимка, которые составили пары 04 октября 2016 – 13 июня 2017 и 13 июня 2017 – 02 октября 2018 (рисунок 10 а, б). Сопоставление результатов, полученных по снимкам различных спутников, с различной длиной волны, с применением различных методов важно для верификации полученных результатов. Смещения за период с октября 2016 по июнь 2017 года не превосходят первые сантиметры, за исключением областей с низкой когерентностью.

Смещения за период с 2016 по 2018 год были весьма незначительными, за исключением узких зон, смещения в которых явно приурочены к локальным формам рельефа. Так, например, смещения в узких зонах в верхней части западного склона вулкана Б. Удина с октября 2016 по июнь 2017 составили 5-8 см в направлении от спутника, а с июня 2017 по октябрь 2018 года смещения амплитудой до 10 см произошли в обратном направлении – к спутнику. Обнаруженные деформации, скорее всего, связаны с поверхностными процессами и динамикой снегового покрова. Согласно приведенным выше оценкам области смещений при активизации магматического очага на глубине 5 км должны иметь линейные размеры на земной поверхности около 10-15 км, что соответствует 0.1-0.15 градусам по широте (2-3 клетки географической сетки на рисунке 10 а, б). Таких областей смещений на интерферограммах не обнаружено.

В разделе 4.2 приводится анализ сейсмологических наблюдений, проведенный коллегами 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. Были четко выделены линейные тренды изменения вдоль широты на ~4 км с севера (55.740°) на юг (55.705°), вдоль долготы также примерно на 4 км с востока (160.555°) на запад (160.474°), и по глубине с 5 до 15 км.

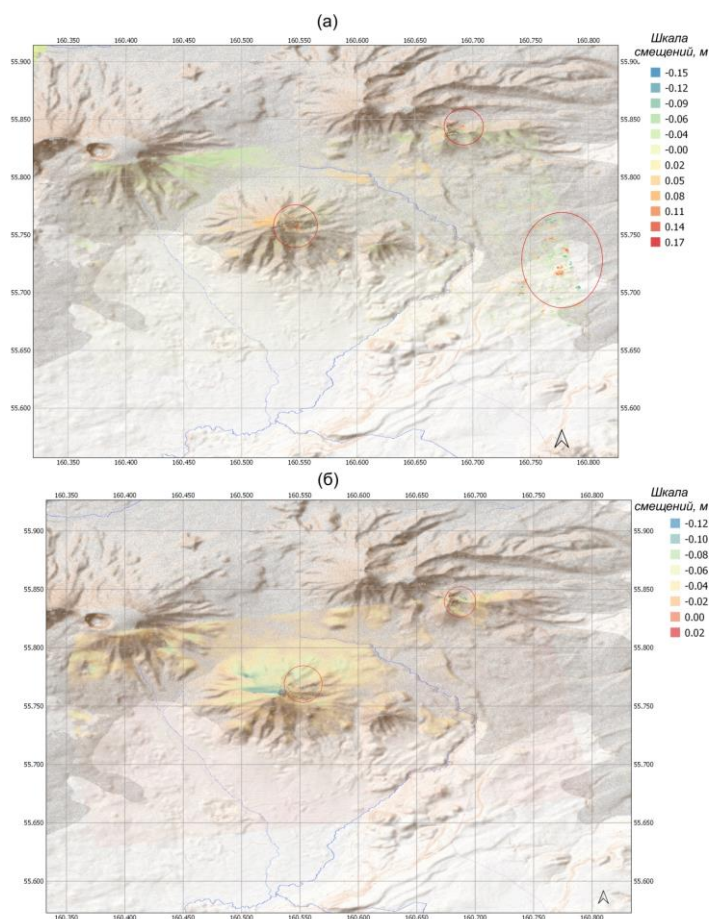


Рисунок 10 – Поля смещений (метры), полученные по парным интерферограммам, построенным по снимкам спутника ALOS-2 PALSAR-2 за периоды а) 04.10.2016 - 13.06.2017 и б) 13.06.2017 – 02.10.2018. Внутри красных контуров находятся области с низкой (< 0.35) когерентностью, оценки смещений в которых не надежны. Отрицательные значения – смещения от спутника, положительные – к спутнику

Выводы по главе 4. Анализ сейсмических данных указывает на удаление и погружение ЦСЭ от вулкана Б. Удина. Полученные результаты по пространственно-временному анализу землетрясений каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН по данным постоянных сейсмологических станций хорошо согласуются с результатами независимых исследований по данным временных станций и с результатами наблюдений за деформацией земной поверхности по снимкам спутника Sentinel-1A и ALOS-2.

Наличие гидравлической связи между районом р. Толуд и районом трещинных извержений Плоского Толбачика также подтверждается тем, что и в 1975 г., и в 2012 г., через несколько дней после начала излияния мощных лавовых потоков, происходили сильные землетрясения с энергетическим классом $K_s \approx 11$ в районе р. Толуд. Описанная выше гидравлическая связь делает вулкан Б. Удина маловероятным местом нового извержения, так как в этом случае магме нужно будет прокладывать путь к поверхности через остывшие, консолидированные и расположенные выше, относительно Толбачинского дола, породы постройки этого потухшего вулкана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодня космические технологии РСА являются неотъемлемой частью инструментария для дистанционного зондирования Земли, которые обеспечивают не только необходимую информацию для мониторинга и прогнозирования изменений в процессах окружающей среды, но и для сравнительного изучения уже произошедших событий природного и техногенного характера, путем анализа архивных снимков.

В современном мире в условиях активного развития индустрии и цифровых технологий становится все более важной информация с высоким разрешением. Созвездия радиолокационных спутников будут играть важную роль в данной задаче, поскольку космический радиолокатор является единственным датчиком, который обладает способностью всепогодной визуализации в любое время суток с высоким разрешением. Примерами приложений являются дистанционное зондирование окружающей среды, передвижения транспорта, мониторинг природной опасности и стихийных бедствий, исследования в области геодинамики и климата, трехмерное и четырехмерное картографирование, задачи разведки и разработки месторождений полезных ископаемых.

Спутниковую радарную интерферометрию сейчас можно уверенно назвать ключевым инструментом для анализа смещений и изменений напряжений, вызванных сильными землетрясениями в земной коре, особенно в отдаленных районах, где недостаточно развиты наземные геодезические и сейсмические сети. Применительно к задачам исследования сейсмических и вулканических процессов на Земле РСА-технологии обладают исключительно высоким потенциалом, особенно в сочетании с технологиями наземных наблюдений.

В представленной работе была использована технология дифференциальной РСА-интерферометрии (DInSAR), которая уже более 20 лет успешно применяется в мире для определения косейсмических и постсейсмических деформаций. Методами РСА-интерферометрии проведен анализ трех сейсмических процессов в районе полуострова Камчатка и Командорских островов.

1. В исследовании Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 (БАЗ) впервые построены поля косейсмических и частично постсейсмических смещений на основе спутниковых данных. Учитывая недостаточную плотность сети пунктов спутниковой геодезии в рассматриваемом районе, использование полей смещений, полученных по данным спутниковой радарной интерферометрии, позволяет получить новые сведения о строении очага землетрясения. Представлена новая модель поверхности разрыва БАЗ, основанная на данных спутниковой геодезии и спутниковой радарной интерферометрии. При построении модели поверхности разрыва использованы данные о косейсмических смещениях с 26 пунктов GPS и полученные методами РСА-интерферометрии данные о поле смещений на островах Беринга и Медный, расположенных в эпицентральной зоне землетрясения. 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.

2. Для Южно-Озерновского землетрясения 29.03.2017 (ЮОЗ) определение косейсмических смещений по данным стационарных пунктов ГНСС оказалось невозможным. В силу удаленности ближайших пунктов от эпицентра события, смещения на них оказались на уровне шумов. Ввиду 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 PCA, стало практически единственной возможностью определить смещения земной поверхности и построить модель поверхности сейсмического разрыва. Нам удалось построить наиболее детальную дифференциальную интерферограмму по снимкам спутника ALOS-2 со 108 трека восходящей орбиты, которая получена впервые и подробно характеризует поле смещений. Был построен ряд моделей поверхности разрыва с различными начальными условиями и условиями регуляризации. Наиболее предпочтительной нам представляется модель с падением на северо-запад с углом простирания 213° и углом падения 51° , которая лучше других приближает спутниковое поле смещений. Также сделан вывод, что разрыв произошел ближе к берегу, на системе разломов, связанной с береговыми горными хребтами.

3. На основе комплексного исследования возможной активизации вулкана Большая Удина сделан вывод об отсутствии признаков внедрения магматического материала от очага в районе р. Толуд в сторону вулкана. Анализ спутниковых данных не выявил существенных смещений земной поверхности в районе вулкана Б. Удина. Полученные по снимкам спутниковых миссий Sentinel-1A и ALOS-2 небольшие смещения за 2017 и 2018 годы могут указывать либо на малую активность глубинных процессов, либо на то, что эти процессы происходили на большой глубине. Эти выводы подтверждаются и исследованием сейсмичности данного района: центр сейсмической энергии постепенно опускается с глубины ~ 5 км под Б. Удиной на глубину ~ 15 км в районе р. Толуд. Тем самым, наблюдавшаяся с конца 2017 г. сейсмическая активность по всей вероятности отражает не активизацию вулкана Б. Удина, а процесс отступления и опускания магмы от этого вулкана в выделенный томографическими методами очаг в районе р. Толуд.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Михайлов, В.О. Новая модель поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. $M_w = 7.8$ на основе данных спутниковой радарной интерферометрии / В.О. Михайлов, В.А. Тимофеева, В.Б. Смирнов, Е.П. Тимошкина, Н.М. Шапиро // **Физика Земли**. – 2022. – № 2. – С. 88–101. (*переводная версия: Mikhailov, V.O. New Model of the Rupture Surface of the $M_w = 7.8$ Near Islands Aleutian Earthquake of July 17, 2017 Based on SAR Interferometry / V.O. Mikhailov, V.A. Timofeeva, V.B. Smirnov, E.P. Timoshkina, N.M. Shapiro // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. – 2022. – Vol. 58. – No. 2. – Pp. 230-242*)
2. Сеньюков, С.Л. Совместное исследование сейсмичности и данных спутниковой радарной интерферометрии для оценки возможного извержения потухшего вулкана Большая Удина / С.Л. Сеньюков, В.О. Михайлов, И.Н. Нуждина, Е.А. Киселева, С.Я. Дрознина, В.А. Тимофеева, М.С. Волкова, Н.М. Шапиро, Т.Ю. Кожевникова, З.А. Назарова, О.В. Соболевская // **Вулканология и сейсмология**. – 2020. – № 5. – С. 26-39. (*переводная версия: Senyukov, S.L. A Joint Study of Seismicity and SAR Interferometry Observations for Assessing the Possibility of an Eruption of the Dormant Bolshaya Udina Volcano / S.L. Senyukov, V.O. Mikhailov, I.N. Nuzhdina, E.A. Kiseleva, S.Ya. Droznina, V.A. Timofeeva, M.S. Volkova, N.M. Shapiro, T.Yu. Kozhevnikova, Z.A. Nazarova, O.V. Sobolevskaya // Journal of Volcanology and Seismology. – 2020. – Vol. 14. – No. 5. – Pp. 305-317.*)

Публикации в сборниках и материалах конференций:

3. Михайлов, В.О. Моделирование поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 с использованием данных РСА-интерферометрии / В.О. Михайлов, В.А. Тимофеева, В.Б. Смирнов, Е.П. Тимошкина, Н.М. Шапиро // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов II всероссийской конференции с международным участием. – М., ИТПЗ РАН, 2021. – С. 72-73.
4. Михайлов, В.О. Новая модель поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. на основе данных РСА-интерферометрии / В.О. Михайлов, В.А. Тимофеева, В.Б. Смирнов, Е.П. Тимошкина, Н.М. Шапиро // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. – М., ИКИ РАН, 2021. – С. 322.
5. Тимофеева, В.А. Обработка космических снимков в задачах дистанционного зондирования Земли: применение технологий радарной спутниковой интерферометрии (построение DEM) / В.А. Тимофеева // Аппроксимационные подходы и анализ геофизических данных: тезисы докладов Школы семинара ИФЗ РАН - НТУ «Сириус», 13-18 июля 2020 г. – М.: ИФЗ РАН, 2020. – С. 28.
6. Тимофеева, В.А. Оценка возможной активизации вулкана Большая Удина на основе совместного исследования сейсмичности и данных РСА-интерферометрии / В.А. Тимофеева, С.Л. Сеньюков, В.О. Михайлов, И.Н. Нуждина, С.Я. Дрознина,

- М.С. Волкова, Н.М. Шапиро, Т.Ю. Кожевникова, З.А. Назарова, О.В. Соболевская // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, 28-29 октября 2020 г.: тезисы докладов и программа конференции. – М.: ИФЗ РАН, 2020. – С. 63-64.
7. Михайлов, В.О. Изучение косейсмических и постсейсмических процессов по комплексу наземных и спутниковых данных / В.О. Михайлов, Е.А. Киселева, Е.П. Тимошкина, В.А. Тимофеева, Н.М. Шапиро, В.Б. Смирнов, С.А.Хайретдинов // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов всероссийской конференции с международным участием. – М., ИТПЗ РАН, 2019. – С. 62-63.
 8. Тимофеева, В.А. Исследование сейсмических и вулканических процессов в районе Курило-Камчатской зоны субдукции на основе спутниковых данных / В.А. Тимофеева, В.О. Михайлов, Е.А. Киселева // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН: тезисы докладов и программа Конференции. – М.: ИФЗ РАН, 2019. – С. 79.
 9. Киселева, Е.А. Некоторые результаты изучения вулканических и сейсмических процессов на Камчатке методами радарной спутниковой интерферометрии / Е.А. Киселева, В.О. Михайлов, В.А. Тимофеева, П.Н. Дмитриев // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М., 2019. – С. 93.

Подписано в печать «__» _____ 2022 г.
Формат 64×84/16. Объем 1,5 усл. печ. л.
Тираж 100 шт. Заказ №__
Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН
123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1
Тел./факс: (499) 254 90 88