На правах рукописи



ОСМАНОВ РУСТАМ СОБИРОВИЧ

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПОЛЕЙ СМЕЩЕНИЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В ГОРНЫХ РАЙОНАХ

Специальность 1.6.9 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

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

Научный руководитель: Михайлов Валентин Олегович, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: [оппонент 1: фамилия, имя, отчество, учёная степень, учёное звание, организация, должность]

[оппонент 2: фамилия, имя, отчество, учёная степень, учёное звание, организация, должность]

Ведущая организация: [ведущая организация: полное наименование, город]

Защита диссертации состоится [дата защиты] г. в [время] на заседании диссертационного совета 24.1.132.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте 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 www.ifz.ru. Автореферат размещён на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации https://vak.gisnauka.ru и на сайте института www.ifz.ru.

Отзывы на автореферат, с подписью, заверенной печатью, в одном экземпляре, с согласиями об использовании персональных данных, просьба направлять по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, учёному секретарю диссертационного совета 24.1.132.01 кандидату физико-математических наук Жосткову Руслану Александровичу.

Автореферат разослан «[дата рассылки]» 2026 г.

Учёный секретарь диссертационного совета 24.1.132.01, кандидат физико-математических наук Р.А. Жостков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы и степень разработанности темы.

Спутниковая радарная интерферометрия применяется для решения широкого класса задач с начала 1990-х гг. Спутниковые снимки, выполненные радарами с синтезированной апертурой (РСА), позволяют строить цифровые модели рельефа местности (ЦМР), фиксировать смещения земной поверхности, связанные с техногенными или природными процессами, включая вулканические и сейсмические процессы, медленные тектонические движения [Massonnet, Feigl, 1998; Bürgmann et al., 2000; Hanssen, 2001; Hooper et al., 2012]. Методы РСА-интерферометрии позволяют с небольшим интервалом по времени (6-12 суток) получать карты смещений и скоростей смещений земной поверхности на обширных территориях, с высоким разрешением и высокой плотностью покрытия, независимо от освещенности и облачности.

Смещения определяются по разности фаз ($\Delta\varphi$) электромагнитного сигнала, отраженного от одного и того же объекта при повторной съемке, которая включает смещения отражающей площадки $\Delta\varphi_{def}$ в проекции на направление на спутник за период повторной съемки, а также различного рода помехи, связанные с погрешностями задания ЦМР $\Delta\varphi_{topo}$ и орбиты $\Delta\varphi_{orb}$, влиянием атмосферы $\Delta\varphi_{atm}$ и с термическим шумом аппаратуры $\Delta\varphi_{noise}$ [Hooper et al., 2004]:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{def} + \Delta\varphi_{noise} + \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_{orb} + \Delta\varphi_{atm}. \quad (1)$$

К настоящему времени разработаны эффективные методы устранения помех $\Delta\varphi_{noise}, \Delta\varphi_{topo}$ и $\Delta\varphi_{orb}$. Помехи, связанные с атмосферными задержками, устранить значительно сложнее, поскольку в них вносят свой вклад изменения температуры, давления и содержания водяного пара с высотой, а также турбулентность, что может завышать или занижать оценки смещений земной поверхности. Наиболее сильно влияние атмосферы проявляется в горных районах, включая рассмотренные в этой работе Камчатку и Крым. Этим определяется актуальность развития методов подавления атмосферных помех.

Полуостров Камчатка – это один из самых активных вулканических районов планеты. На полуострове сосредоточено более 30 действующих вулканов, некоторые из них расположены в густонаселённых районах. Несмотря на то, что радиолокационная съёмка Камчатки осуществляется достаточно давно, например, спутниками RADARSAT-1 с 1996 по 2013 г., ALOS-1 с 2006 по 2011 г., ALOS-2 и Sentinel-1 с 2014 г., данные спутниковой интерферометрии до сих пор не используются в системах постоянного мониторинга региона, в основном из-за экстремальных погодных условий и горного рельефа. Активная циклоническая деятельность, частые осадки, снег, горный ландшафт приводят к декорреляции снимков. Из-за мощного снежного покрова период наблюдений сокращается до 4-5 месяцев. Для изучения отдельных вулканических и сейсмических событий на Камчатке РСА-интерферометрию применяли иностранные (D. Dzurisin, J. Kubanek, P. Lundgren, Z. Lu, L. Ji, R. Mania, S. Samsonov, M. Vassileva и их соавторы) и российские исследователи

(М.С. Волкова, А.И. Захаров, Л.Н.Захарова, Е.А. Киселева, А.М. Конвисар, В.О. Михайлов, В.А. Тимофеева, Е.П. Тимошкина и их соавторы).

Мониторинг Крымского полуострова особенно важен из-за нарастающей активности экзогенных геологических процессов. В частности, выявление и мониторинг многочисленных оползневых проявлений на обширной территории Крыма — задача крайне сложная, которую очень трудно, если вообще возможно, выполнить без использования дистанционных методов. Однако до сих пор опубликованных работ на основе данных РСА-интерферометрии по Крыму найти не удалось.

Успешное применение РСА-интерферометрии для мониторинга горных районов требует совершенствования методов обработки спутниковых снимков, тщательного устранения атмосферных помех за счет использования погодных моделей и данных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). В этом состоит актуальность развития методов оценки и интерпретации полей смещений по данным спутниковой РСА-интерферометрии в горных районах.

Цель работы — разработка и обоснование на реальных данных методики применения спутниковой радиолокационной интерферометрии для оценки и анализа полей смещений земной поверхности в сложных природных условиях, включая разработку методики расчёта атмосферных поправок на основе данных ГНСС, сервиса GACOS и местных метеостанций, анализ применимости различных методов интерферометрии и снимков различного диапазона длин волн в системе регулярного мониторинга вулканических районов Камчатки. Разработка методики разномасштабного анализа полей смещений на обширных территориях с выделением локальных оползневых смещений на фоне региональной тектонической составляющей на примере Крымского полуострова.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Сформировать базу данных радиолокационных снимков спутника Sentinel-1A C-диапазона и временных рядов данных станций ГНСС, расположенных в районе исследований. Выполнить интерферометрическую обработку снимков для всех объектов исследования с применением различных технологий спутниковой РСА-интерферометрии, а также обработку временных рядов ГНСС.

2. Разработать и верифицировать численными расчетами методику учёта атмосферных поправок с использованием комплекса данных: ГНСС, сервиса GACOS, местных метеостанций; построить эмпирическую погодную модель (ЭПМ) по данным местных метеостанций; выполнить оценку точности атмосферных поправок моделей ЭПМ и GACOS и оценить эффективность их применения для коррекции полей смещений.

3. На основе анализа результатов расчетов выявить особенности работы методов спутниковой интерферометрии в горных районах со сложными атмосферными и геологическими условиями (низкая когерентность, влияние рельефа и атмосферы). Исследовать преимущества и недостатки различных методов оценки смещений в применении к раз-

ным наборам спутниковых данных на территории Авачинско-Корякской группы вулканов (АКГВ) за длительный период времени с 2016 по 2024 год.

4. По новым радарным снимкам, полученным с двух орбит, исследовать оседания пирокластических отложений вулкана Шивелуч. Верифицировать ранее построенную модель оседания потока по новым данным с двух орбит.

5. Разработать методику разномасштабного анализа полей смещений на обширной территории на примере п-ова Крым; разработать алгоритм автоматизированного выделения локальных оползневых процессов на фоне региональной составляющей. Выполнить анализ полученных полей смещений.

Методология и методы исследования. Для обработки радарных снимков применялись методы дифференциальной интерферометрии (DInSAR), малых базовых линий (SBAS), реализованные в ПО SARscape, и методы суммирования. Обработка временных рядов ГНСС выполнена в ПО Pride PPP. Расчёт атмосферных поправок выполнен по данным фазовых задержек, предоставляемых в виде карт в формате GeoTIFF онлайн-сервисом Generic Atmospheric Correction Online Service (GACOS) (http://www.gacos.net) и по данным построенной эмпирической погодной модели. Для расчёта ЭПМ использованы измерения метеопараметров на местных метеостанциях Камчатки, предоставленные в открытом доступе сайтом rp5.ru. Оценка точности поправок GACOS и ЭПМ выполнена по данным ГНСС, которые были приняты за эталонные. Эффективность применения поправок оценивалась набором критериев: дисперсия, корреляция поля смещений с рельефом, стандартное отклонение и вариограммный анализ. Для выявления оползневых районов в горной местности разработан алгоритм автоматизированного поиска локальных оползневых деформаций на обширной территории п-ова Крым.

Научная новизна.

1. Разработана двухуровневая методика расчета атмосферных фазовых задержек для коррекции интерферометрических полей смещений при наличии сети станций ГНСС: на первом этапе по независимым данным ГНСС оценивается точность моделей зенитных задержек, полученных с сервиса GACOS и рассчитанных по ЭПМ. На втором этапе, используя статистические критерии (дисперсия, корреляция с топографией, стандартное отклонение, наличие пространственного тренда), оценивается влияние атмосферной поправки на итоговое поле смещений. В двух исследованных выборках поправка GACOS дала положительный результат по принятым статистическим критериям в 63,3 и 74 % случаев; для ЭПМ во второй выборке эта доля составила 48 %. Обоснованы критерии применимости атмосферных поправок для территории Камчатки (глава 2).

2. Впервые получены непрерывные данные мониторинга Авачинско-Корякской группы вулканов с 2016 по 2024 г. на основе радиолокационных изображений L- и C-диапазонов (спутники ALOS-2, Sentinel-1A) с применением комплекса методов обработки: дифференциальной интерферометрии (DInSAR), суммирования последовательных интерферограмм и метода малых базовых линий (SBAS). Отсутствие выраженных деформаций на склонах вулканов за восьмилетний период наблюдений (средние скорости

смещений не превышают ±10 мм/год) согласуется с данными об отсутствии вулканических и сейсмических процессов в области исследований. В данном случае мониторинг АКГВ выступает как нулевой тест — контрольная проверка корректности предложенного комплекса методов при ожидаемых условиях (глава 3). Разработанный комплекс методов будет и дальше использоваться для мониторинга АКГВ.

3. По снимкам спутника Sentinel-1A, выполненным с двух орбит за 2022 г., получены новые данные о смещениях поверхности пирокластических отложений вулкана Шивелуч. Подтверждена устойчивость связи скорости оседания поверхности пирокластического потока с его мощностью (глава 3). Новые данные подтверждают определенные ранее по снимкам 2020 – 2021 гг. параметры термомеханической модели, которая описывает вклад различных процессов (термоусадка, компакция, эрозия) в оседание пирокластических отложений вулкана Шивелуч извержения 29.08.2019.

4. Впервые по данным РСА-интерферометрии рассчитано поле средних скоростей смещений на всю территорию полуострова Крым (около 27 тыс. км²) по 146 снимкам спутника Sentinel-1A с 2020 по 2024 год. Разработан метод разномасштабного анализа полей смещений с автоматизированным выделением локальных деформационных аномалий, связанных с оползневыми процессами на фоне региональной составляющей. В результате выявлен 61 полигон локальных деформаций природного и техногенного происхождения; установлена скорость смещения опасных объектов: оползней Большой Алупкинской системы, Марьинского оползня в Симферополе, техногенного объекта «Гаспринская свалка» и др. (глава 4).

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Разработанная двухуровневая методика расчёта атмосферных фазовых задержек для вулканических районов Камчатки, объединяющая проверку по независимым данным ГНСС точности зенитных задержек по сервису GACOS и рассчитанных по эмпирической погодной модели, построенной по данным локальных метеостанций, позволяет оценить эффективность устранения атмосферных эффектов в полях смещений, полученных методами РСА-интерферометрии (глава 2).

2. Разработанная методика обработки радарных снимков различных спутников с применением комплекса методов РСА-интерферометрии создает основу для постоянного мониторинга вулканов Камчатки. Методика обоснована результатами численных расчетов для района Авачинско-Корякской группы вулканов (глава 3).

3. Основанная на совокупности статистических и морфометрических критериев методика разномасштабного анализа интерферометрических полей смещений позволяет автоматизировать процесс выделения связных областей локальных оползневых деформаций склонов относительно регионального медианного фона. Методика обоснована результатами расчета и интерпретации полей смещений для п-ова Крым (глава 4).

4. Впервые построенные карты средних скоростей смещений и временные ряды смещений поверхности полуострова Крым за 2020-2024 гг. позволили выявить области локальных деформаций природного и техногенного происхождения и определить скорости и периоды активизации смещений отдельных оползневых и техногенных объектов (глава 4).

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическое значение имеют критерии оценки эффективности атмосферных поправок и методика совместного применения различных интерферометрических технологий в сложных природных условиях. Разработанные критерии позволяют определить, в каких конкретных случаях поправки не улучшают результат.

Впервые полученные поля смещений для п-ова Крым характеризуют развитие оползневых, эрозионных и техногенных процессов. Они могут использоваться при оценке опасности для населения и инфраструктуры. Результаты по вулканическим районам Камчатки важны для интерпретации деформаций и организации регулярного мониторинга, в том числе вблизи населённых пунктов. В этом состоит практическая значимость работы.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов обеспечивается сопоставлением интерферометрических оценок с независимыми данными и взаимным контролем методов. Атмосферные задержки моделей GACOS и ЭПМ проверены по измерениям на шести пунктах Камчатской сети ГНСС; временные ряды смещений по Крыму сопоставлены с данными станции ГНСС KTVL — невязка средних скоростей за 2020–2024 гг. не превышает 0,05 мм/год. Мониторинг Авачинско-Корякской группы вулканов при отсутствии значимых сейсмических и вулканических событий выступил как нулевой тест, который подтвердил корректность применяемого комплекса спутниковых методов.

Апробация результатов и публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Все издания входят в международные базы данных и «Белый список». Список приведён в конце автореферата; номера [1–6] в тексте относятся к публикациям автора. Основные результаты работы докладывались на научных конференциях: IX и X Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов» (Петропавловск-Камчатский, 2023 и 2025 гг.); Научная конференция молодых учёных и аспирантов ИФЗ РАН (Москва, 2023 и 2024 гг.); XXI Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2023 г.).

Личный вклад автора. Автором выполнены интерферометрическая обработка радиолокационных снимков, расчёт полей смещений и средних скоростей смещений для всех рассмотренных объектов, разработка и программная реализация метода разномасштабного анализа полей смещений для территории полуострова Крым и выделения локальных областей оползневых деформаций (глава 4). Анализ и интерпретация полученных полей смещений выполнены совместно с научным руководителем. В работах по анализу эффективности атмосферных поправок (глава 2) автор участвовал в обработке дан-

ных, проведении численных расчетов и анализе результатов под руководством к.ф.-м.н. М.С. Волковой. Для вулкана Шивелуч (глава 3) автор принимал участие в расчёте полей смещений, обсуждении и интерпретации результатов; термомеханическая модель оседания была построена соавторами ранее.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 92 наименований. Работа изложена на 164 страницах, содержит 39 рисунков и 10 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю академику РАН Валентину Олеговичу Михайлову за научное руководство, ценные рекомендации, неизменное внимание к работе и всестороннюю поддержку на всех этапах исследования. Особую признательность автор выражает к.ф.-м.н. Марии Сергеевне Волковой за большой вклад в его научное становление, переданные знания и исследовательский опыт, постоянную научную и методическую помощь и поддержку при подготовке диссертации. Автор также благодарит коллег по лаборатории комплексной геодинамической интерпретации наземных и спутниковых данных ИФЗ РАН за помощь и обсуждение результатов; сотрудников Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Автор благодарит космические агентства ESA, JAXA, разработчиков сервиса GACOS и Nevada Geodetic Laboratory — за предоставленные данные.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, обоснованы научная новизна, положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость, методология, степень достоверности и апробация результатов.

В главе 1 «Теоретические и методические основы спутниковой радиолокационной интерферометрии и её применение для оценки и интерпретации полей смещений в горных районах» даны основные понятия и определения, используемые в технологии спутниковой радарной интерферометрии. Рассмотрен принцип формирования интерферометрической фазы, дано представление о когерентности снимков и геометрии съёмки, выполняемой космической системой. Основная особенность радарной системы состоит в том, что измерения выполняются вдоль наклонной линии визирования (англ. – line of sight, LOS). По данным радарных измерений можно получить информацию о смещениях земной поверхности в проекции на направление LOS. В то же время данные съёмки с двух направлений полёта спутника позволяют восстановить вертикальную и восточную компоненты вектора смещений.

Далее в главе 1 рассмотрены методы обработки радарных снимков. Сопоставлены методы, основанные на обработке пары снимков (дифференциальная интерферометрия, DInSAR), а также на совместном анализе серии снимков: суммирование, методы устойчивых (PS) и распределённых отражателей (SBAS). Рассмотрены проблемные вопросы, связанные с декорреляцией снимков, к которой приводят неблагоприятные ландшафтные и

климатические условия: растительность, снег, горный рельеф; с компенсацией ошибок задания цифровой модели рельефа и орбит, с процедурой развёртки фазы, устранением атмосферных артефактов.

Показано, что моделирование задержек, возникающих при прохождении спутникового электромагнитного излучения через атмосферу, — критически важная задача РСА-интерферометрии, не имеющая в настоящее время общего решения. Оценке атмосферных поправок посвящена глава 2.

Выводы по главе 1. Методы радарной интерферометрии позволяют эффективно оценивать поля смещений земной поверхности с высокой точностью и на больших по площади территориях, но при этом существуют ограничения, связанные с влиянием атмосферы, особенно в горных районах, где сложный рельеф с перепадом высот также может вносить дополнительные искажения в поля смещений или приводить к потере сигнала. В связи с этим требуется разработка специальных методов комплексной обработки радарных данных и эффективных методик подавления атмосферных помех.

Глава 2 «Оценка и учёт атмосферных фазовых задержек при определении полей смещений в вулканических районах Камчатки методами РСА-интерферометрии» посвящена методам расчёта атмосферных поправок и разработке критериев для оценки их эффективности [3, 5, 6].

На прохождение электромагнитного сигнала через атмосферу оказывают влияние тропосфера и ионосфера. Тропосфера вносит существенные искажения в результаты определения смещений по снимкам коротко- и средневолновых диапазонов, в том числе спутника Sentinel-1A. Наличие в атмосфере водяного пара приводит к изменению скорости распространения радиоволн. Из-за изменения температуры, давления, содержания водяного пара с высотой атмосфера расслоена по вертикали. Перемешивание слоёв турбулентными потоками, а также неоднородность поля силы тяжести [Ингель, Макоско, 2022] обусловливают трёхмерную неоднородность атмосферы во всём её объёме. Таким образом, вклад атмосферы $\Delta\varphi_{atm}$ можно разделить на составляющие двух типов – стратифицированную и турбулентную [Hanssen, 2001]. Турбулентная компонента искажает поле смещений как в горных областях, так и на равнинной местности, а стратифицированная – только в горных районах.

В основном выделяют три подхода для коррекции атмосферных помех: алгоритмические методы коррекции фазы; корреляционный анализ; применение численных погодных моделей. На основе погодной модели HRES (High Resolution) и с привлечением дополнительных данных (ГНСС) для разделения стратифицированной и турбулентной компонент помехи [Yu et al., 2017, 2018] создан онлайн-сервис GACOS, который предоставляет возможность получить карты зенитных абсолютных фазовых задержек в метрах на любую территорию и дату радарной съёмки. Во второй главе диссертации приведён анализ эффективности поправок, рассчитанных по данным этого сервиса, на примере 30 интерферограмм для Камчатских вулканов, расположенных в северной, центральной и южной части п-ова. На рисунке 1 представлен результат успешной коррекции полей смеще-

ний. Интерферометрический сигнал (рис. 1, колонка 1) мог быть ложно интерпретирован как смещения склонов вулканов (рис. 1, колонка 2). Однако карты поправок GACOS (рис. 1, колонка 3) показали, что почти весь полезный сигнал состоит из атмосферной помехи: поля смещений после вычитания поправок не содержат существенных деформаций (рис. 1, колонка 4). Успешное применение поправки получено в 63,3 % случаев. Тем не менее в ряде случаев наблюдался неудовлетворительный результат: появление нового или усиление существующего пространственного тренда, и/или усиление тропосферного эффекта.

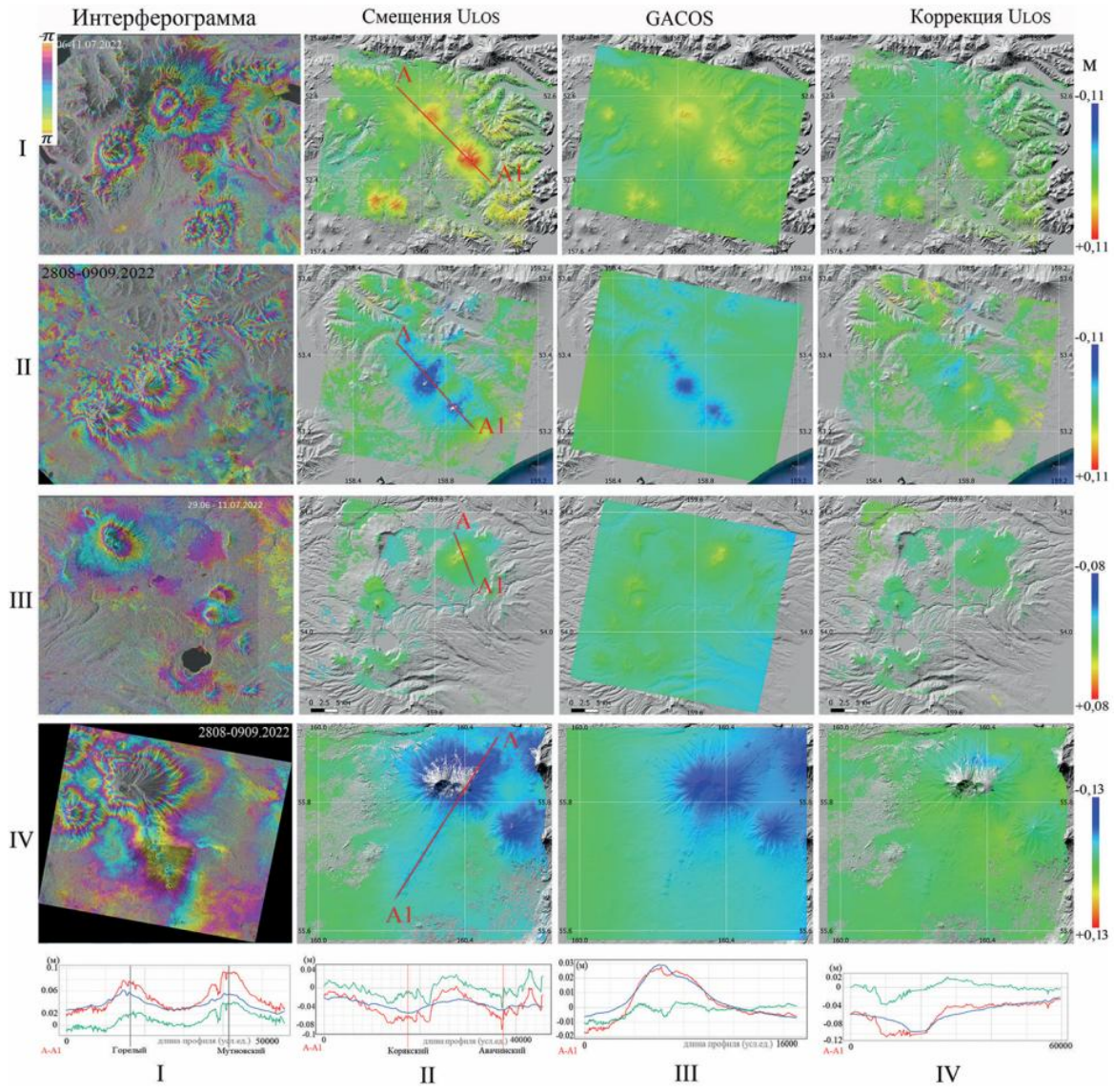


Рисунок 1 – Примеры эффективной коррекции GACOS. Столбцы: интерферограмма (в радарных координатах ось X направлена влево), исходное поле смещений, поправка и результат коррекции; снизу — профили. I — Мутновский (29.06–11.07.2022); II — АКГВ (28.08–09.09.2022); III — Карымский (29.06–11.07.2022); IV — Толбачик (28.08–09.09.2022). На профилях красная линия – исходные смещения, синяя линия – поправка, зеленая линия – смещения после коррекции

Точность атмосферных поправок GACOS тем выше, чем плотнее и равномернее распределены станции ГНСС. Но на Камчатке и в Крыму сеть ГНСС недостаточно плотная,

при этом данные целого ряда станций не передаются в международные банки данных и не используются сервисом GACOS. Кроме того, погодная модель HRES учитывает метеоизмерения с интервалом 6 часов и эти данные могут не соответствовать реальным погодным условиям исследуемых территорий на время радарной съёмки. При исследовании изменений высоты лесного полога показано, что расчёты без поправок GACOS противоречили наземным наблюдениям [Бондур и др., 2024].

Для исследования точности определения фазовых задержек на примере Камчатки была построена локальная эмпирическая погодная модель (ЭПМ), основанная на данных местных метеостанций: Эссо, Ключи, Усть-Камчатск, Семячик, Козыревск, Мильково. Для этого использованы численные модели изменений по вертикали атмосферного коэффициента рефракции в зависимости от давления, температуры и содержания водяного пара в атмосфере. Далее оценена точность ЭПМ и модели GACOS путём сопоставления их с задержками, рассчитанными по данным станций ГНСС КФ ЕГС РАН ATLS, BZ07, BZGD, KLU1, KOZS и MAYS в районе Ключевской группы вулканов. Результаты показали, что по всем критериям оценок точности модель GACOS имеет меньшую погрешность и лучше совпадает с данными, полученными по ГНСС в пунктах сопоставления результатов. Относительные невязки задержек эмпирической модели и ГНСС лежат в диапазоне от 0 до 5,7 %, а для задержек GACOS относительные невязки не превышают 1,6 % (рис. 2). При этом для моделей GACOS и ЭПМ в среднем относительная невязка равна 0,3 % и 0,9 % соответственно, а среднеквадратические ошибки 0,6 см и 2,3 см.

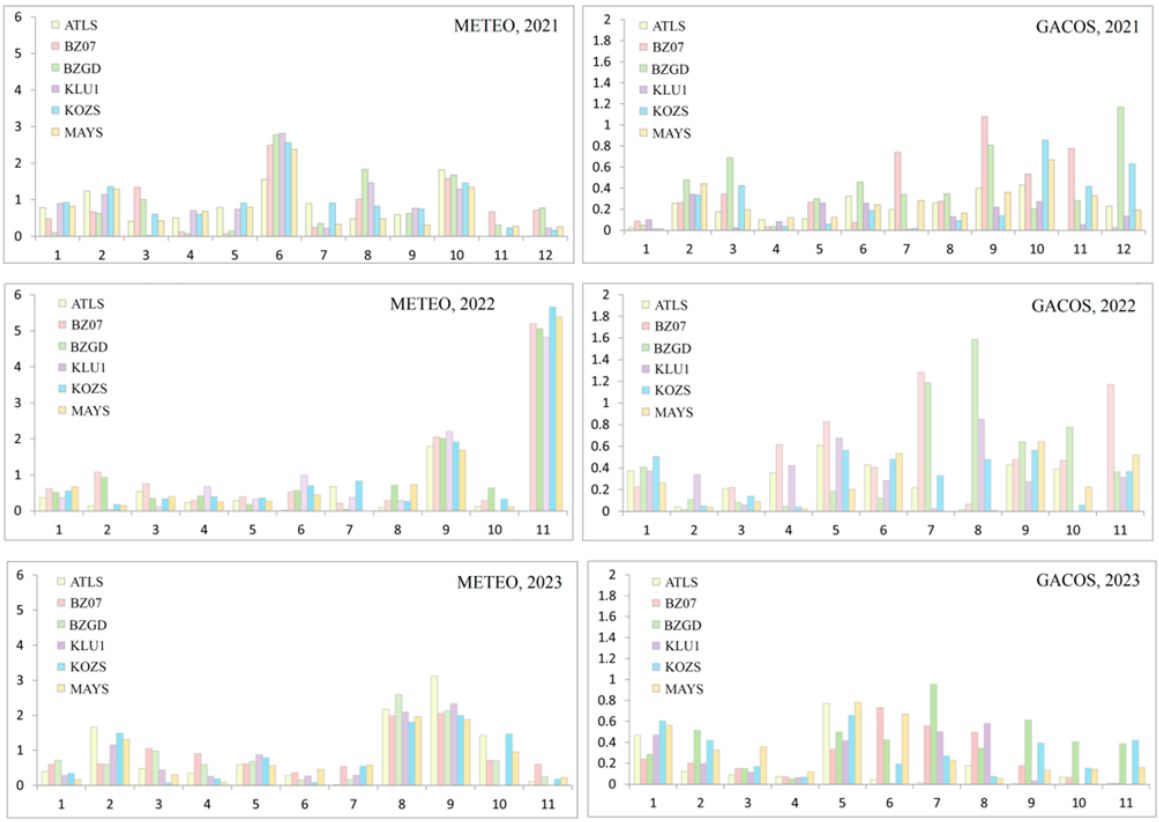
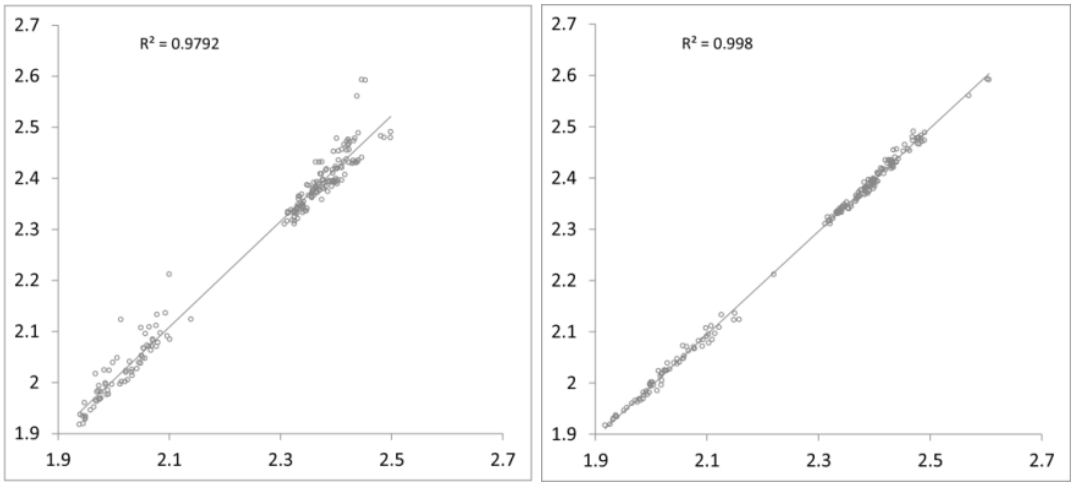


Рисунок 2 – Относительные невязки задержек ЭПМ (слева) и GACOS (справа) по данным ГНСС, %. Цвета соответствуют станциям; масштабы диаграмм различаются

В целом, на пунктах ГНСС получена хорошая точность фазовых задержек по обеим моделям: средняя относительная невязка менее 1 %, а также очень высокий коэффициент детерминации зависимостей сравниваемых моделей, практически соответствующий коэффициенту корреляции, равному 1 (рис. 3). Кроме того, для 25 % результатов получено, что эмпирическая модель превосходит по точности модель GACOS, т.е. величины задержек по ЭПМ ближе к задержкам, рассчитанным по измерениям на пунктах ГНСС.



а б

Рисунок 3 – Сопоставление атмосферных фазовых задержек, рассчитанных по погодным моделям, с задержками по данным станций ГНСС. По вертикальной оси отложены задержки, рассчитанные по данным ГНСС на 34 даты, по горизонтальной оси: задержки, рассчитанные по ЭПМ (а) и задержки, полученные по модели GACOS (б). R² – коэффициент детерминации.

Следующим этапом проведён сравнительный анализ результатов применения атмосферных поправок к конкретным полям смещений района Ключевской группы вулканов. Поля смещений рассчитаны по 24 радарным снимкам спутника Sentinel-1A, выбранным на периоды времени 29.05-28.07.2021, 24.05-21.09.2022, 19.05-28.09.2023 гг. Важно, что здесь рассматривается вулканический район в активную фазу извержений, сопровождавшихся существенными изменениями компонентного состава атмосферы, загрязнением различными аэрозолями и распространением пепловых аэрозольных облаков и шлейфов на огромные расстояния.

Эффект от поправки оценивался по относительному изменению дисперсии $\delta_{Var} = (Var(U_{los}) - Var(U_{corr}^{model}))/Var(U_{los}) * 100\ \%$ (где U_{los} – поле смещений до введения поправки, U_{corr}^{model} – поле смещений, скорректированное атмосферными поправками, рассчитанными соответственно по модели GACOS (обозначим A_{gacos}) или по ЭПМ (обозначим A_{meteo})), а также по корреляционной связи значений поля смещений с топографией. Критерием снижения уровня помех и уменьшения шума считается положительное изменение относительной дисперсии ($\delta_{Var} > 0$). Критерием отсутствия зависимости значений поля смещений от топографии считается корреляция, коэффициент которой не превышает значения 0,3 ($C \leq 0{,}3$). Наличие пространственного тренда определялось с помощью вариограммного

анализа. Вариограмма определялась как: $\gamma(h) = 1/(2N(h)) \Sigma_i [p(x_i) - p(x_i + h)]^2$, $i = 1,\dots, N(h)$, где $N(h)$ – количество точек $p(x)$, разделённых вектором h, x_i – координата точки. При анализе вариограммы мы рассматриваем такие параметры, как порог вариограммы – значение, к которому стремится $\gamma(h)$, начиная с некоторого расстояния h.

Положительный результат, удовлетворяющий условиям уменьшения шума и снижения тропосферного эффекта, получен для 74 % интерферограмм с A_{gacos}, а с A_{meteo} – для 48 % интерферограмм. Хотя в большинстве случаев улучшения от A_{meteo} невелики и по критерию уменьшения тропосферного эффекта результаты поправок сопоставимы, в районах действующих вулканов может быть отмечено преимущество ЭПМ, поскольку эта модель не рассматривает свойства сложных процессов, влияющих на состав атмосферы. На рисунке 4 можно видеть, что при вычитании поправки A_{gacos} в поле смещений появилась аномалия в районе Ключевского вулкана, которая отсутствует как в исходном поле, так и после поправки A_{meteo}.

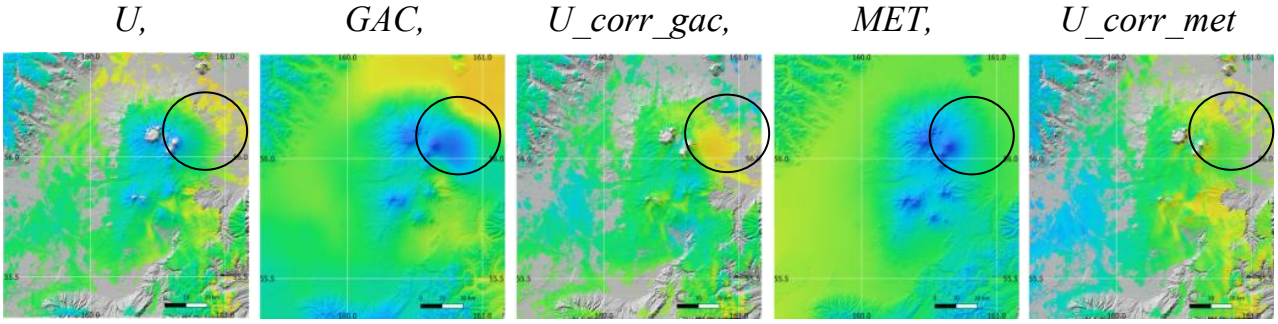


Рисунок 4 – 1-я колонка – исходные поля смещений Ulos, рассчитанные по снимкам 23.08-04.09.2023 (C = −0,63), 2-я колонка – атмосферные поправки A_{gacos}. 3-я колонка – смещения с поправкой A_{gacos} (C = 0,01, δVar = 34,81 %). 4-я колонка – атмосферные поправки Ameteo. 5-я колонка – смещения с поправкой A_{meteo} (C = 0,17, δVar = −35,88 %). Чёрным контуром обозначена область, где после поправки A_{gacos} проявилась аномалия

Выводы по главе 2. Поскольку половина метеостанций и пунктов ГНСС, по которым рассчитывалась эмпирическая погодная модель, – это локальные станции Камчатской сети, которые не входят в глобальную сеть, полученные результаты дают независимую оценку точности поправок с сайта GACOS на территорию полуострова.

Построенная в работе эмпирическая модель атмосферы обеспечивает хорошую точность расчетов в пунктах ГНСС, и рассчитанные по этой модели задержки позволяют с высокой точностью устранять атмосферные задержки из полученных полей смещений земной поверхности.

В целом модели GACOS во многих случаях позволяют эффективно устранять атмосферные помехи и повышать точность оценки полей смещений. В двух наборах данных доля интерферограмм с положительным результатом составила 63,3 и 74 % соответственно. В первом исследовании максимальная стандартная ошибка уменьшилась с 0,022 до 0,011 м, а во втором среднее по серии стандартное отклонение — с 1,7 до 1,2 см при коррекции GACOS.

В районах действующих вулканов модель GACOS фиксирует пепловые облака и шлейфы, которые прозрачны для радаров и не отражаются в спутниковых данных. Поправка GACOS вносит артефакты в поле смещений, формируя области положительных или отрицательных аномалий, не связанных со смещениями земной поверхности. Такие области требуют отдельной проверки и анализа.

Приведенные в главе 2 результаты обосновывают первое защищаемое положение: «Разработанная двухуровневая методика расчёта атмосферных фазовых задержек для вулканических районов Камчатки, объединяющая проверку по независимым данным ГНСС точности зенитных задержек по сервису GACOS и рассчитанных по эмпирической погодной модели, построенной по данным локальных метеостанций, позволяет оценить эффективность устранения атмосферных эффектов в полях смещений, полученных методами РСА-интерферометрии».

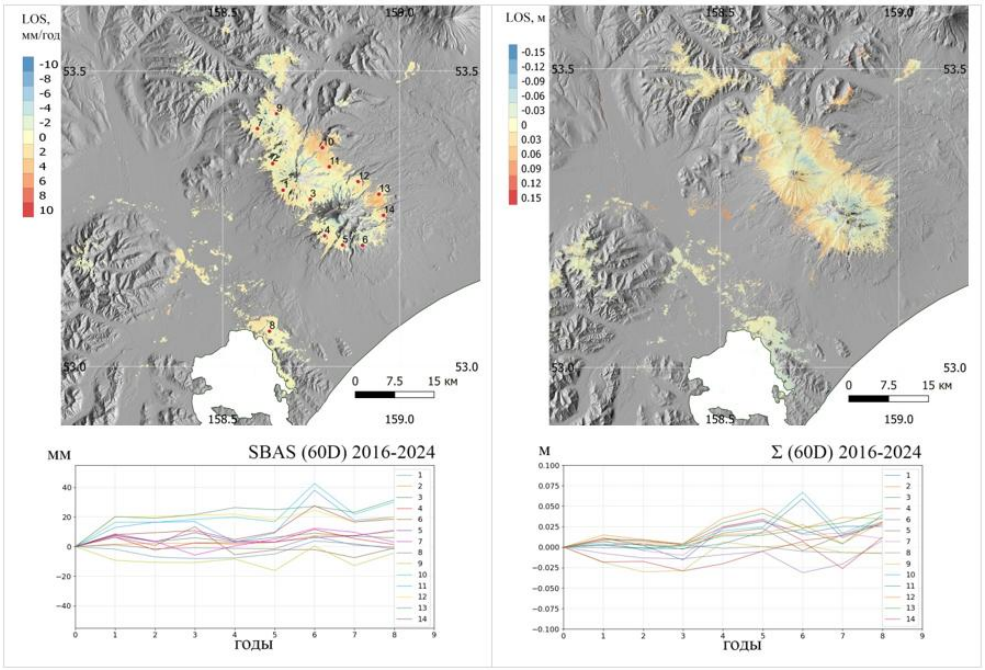
Глава 3 «Методика мониторинга вулканических районов Камчатки по данным спутниковой радиолокационной интерферометрии»

Глава 3 посвящена развитию методики эффективного выявления смещений земной поверхности по данным РСА-интерферометрии в сложных климатических и ландшафтных условиях. Методика предназначена для использования в системах постоянного мониторинга. Исследованы преимущества и недостатки различных методов оценки смещений в применении к разным наборам спутниковых данных на территории Авачинско-Корякской группы вулканов (АКГВ) за длительный период времени с 2016 по 2024 год. Радиолокационные данные (табл. 1) отличались частотным диапазоном (L – дециметровые и C – сантиметровые длины волн), геометрией съёмки (восходящая – A или нисходящая – D орбита движения спутника), количеством снимков: рассмотрены как короткие серии снимков с длинным временным интервалом между съёмками, так и длинные серии снимков с коротким временным интервалом. По этим данным рассчитаны поля смещений по парам снимков (метод DInSAR), поля накопленных смещений за указанный период исследования (метод суммирования) и поля средних скоростей смещений (метод SBAS) за 8 лет (рис. 5). Схема обработки выбиралась с учётом длины волны, длительности ряда и сезонной когерентности снимков. Для короткой серии ALOS-2 использовались методы DInSAR и суммирование последовательных интерферограмм. Для Sentinel-1A сравнивались длинная серия снимков бесснежных периодов 2021–2024 гг. и ежегодные наблюдения с двух орбит за 2016–2024 гг. В длинной серии пересечение когерентных областей сокращало площадь покрытия. Для ежегодных наблюдений выбирались снимки конца августа — начала сентября, обеспечивавшие наибольшую когерентность при годовом интервале. Последовательность из восьми интерферограмм суммировалась для получения накопленных смещений. Взаимный контроль выполнялся сопоставлением накопленных смещений по суммированию и SBAS за одинаковый период и для одной орбиты. При обработке Sentinel-1A применялись поправки GACOS; остаточная атмосферная помеха оценивалась по корреляции с рельефом и вариограммам [4].

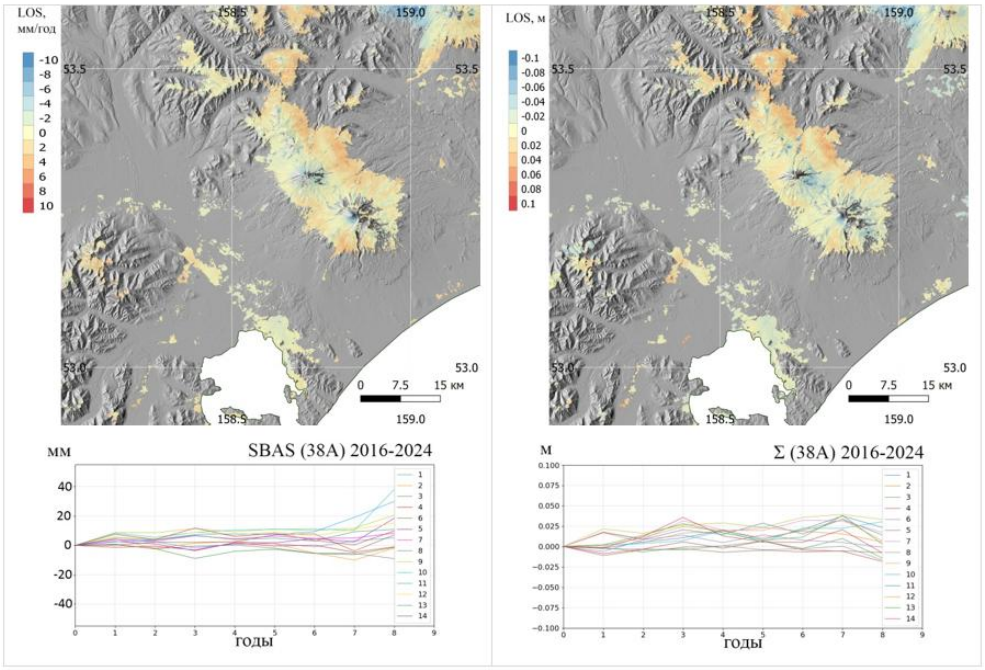
Анализ динамики смещений поверхности на склонах вулканов по временным рядам показал, что средняя скорость смещений не превышает ±10 мм/год, а накопленные смещения на склонах вулканов не превосходят ±10 см за восьмилетний период. Решения, полученные с помощью различных подходов, хорошо согласуются друг с другом, учитывая погрешности отдельных методов. Результаты, полученные различными методами, имеют высокую корреляцию (0,62–0,77), что свидетельствует о надёжности оценок полей смещений (рис. 6).

Таблица 1 – Использованные в работе данные радиолокационных спутниковых систем

Спутник	Длина волны, см	Орбита	Угол съёмки, °	Кол-во снимков	Период исследования
ALOS-2	23,6 (L)	10D	33,7–38,8	6	2016-2021
Sentinel-1A	5,6 (C)	111A	39,6–45,4	31	2021-2024
Sentinel-1A	5,6 (C)	60D	36–40,6	9	2016-2024
Sentinel-1A	5,6 (C)	38A	31–37,6	9	2016-2024

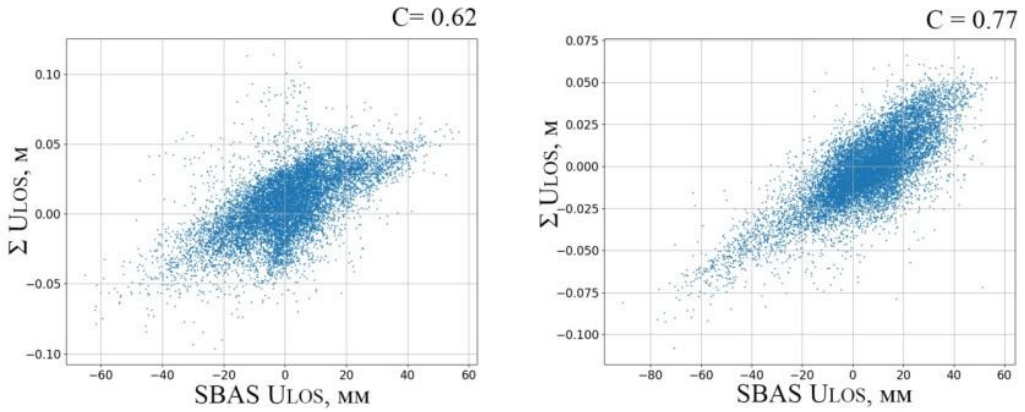


А



Б

Рисунок 5 – Слева — средние скорости LOS по методу SBAS, мм/год; справа — накопленные смещения по суммированию интерферограмм, м. А — орбита 60D; Б — 38A. Под картами — временные ряды за 2016–2024 гг.: слева в мм, справа в м



а б

Рисунок 6 – Сопоставление результатов накопленных смещений, полученных методом SBAS (горизонтальная ось, мм), и суммированием парных интерферограмм (вертикальная ось, м). а) – по снимкам с нисходящей орбиты 60D. б) – по снимкам с восходящей орбиты 38A

В работе показано, что различные методы интерферометрии (DInSAR, суммирование интерферограмм, SBAS) дополняют друг друга и их совместное использование позволяет верифицировать результаты.

Отсутствие заметных смещений на склонах вулканов за длительный период времени свидетельствует об отсутствии вулканических и сейсмических процессов в АКГВ. Поскольку в данный период также не сообщалось о сильных сейсмических и вулканических событиях в регионе, мониторинг АКГВ в данном случае выступает как нулевой тест — контрольная проверка корректности предложенного комплекса методов при ожидаемых условиях.

Заметным вулканическим событием в 2019 году стало извержение вулкана Шивелуч, произошедшее 29 августа. Мониторинг поверхности склонов вулкана с 2020 по 2022 год позволил обнаружить область аномальных смещений, совпадающую с положением пирокластического потока, сошедшего во время этого извержения. За 2022 год оценка средних скоростей смещений поверхности пирокластического потока выполнена по данным с двух орбит (по 11 снимкам нисходящей орбиты 60D и 13 снимкам восходящей 140A) методом SBAS [2]. Снимки, полученные с двух орбит, позволяют выделить вертикальную и восточную компоненты вектора смещений земной поверхности. Скорость вертикального оседания пирокластического потока достигает 150 мм/год (рисунок 7 слева). С 2020 по 2022 г. фиксируется связь скорости оседания потока и его мощности с коэффициентами корреляции −0,69, −0,68 и −0,57 соответственно (см. рис. 7 справа). Большой разброс значений относительно линии тренда свидетельствует о влиянии эрозионных процессов, например, выветривания и размыва отложений.

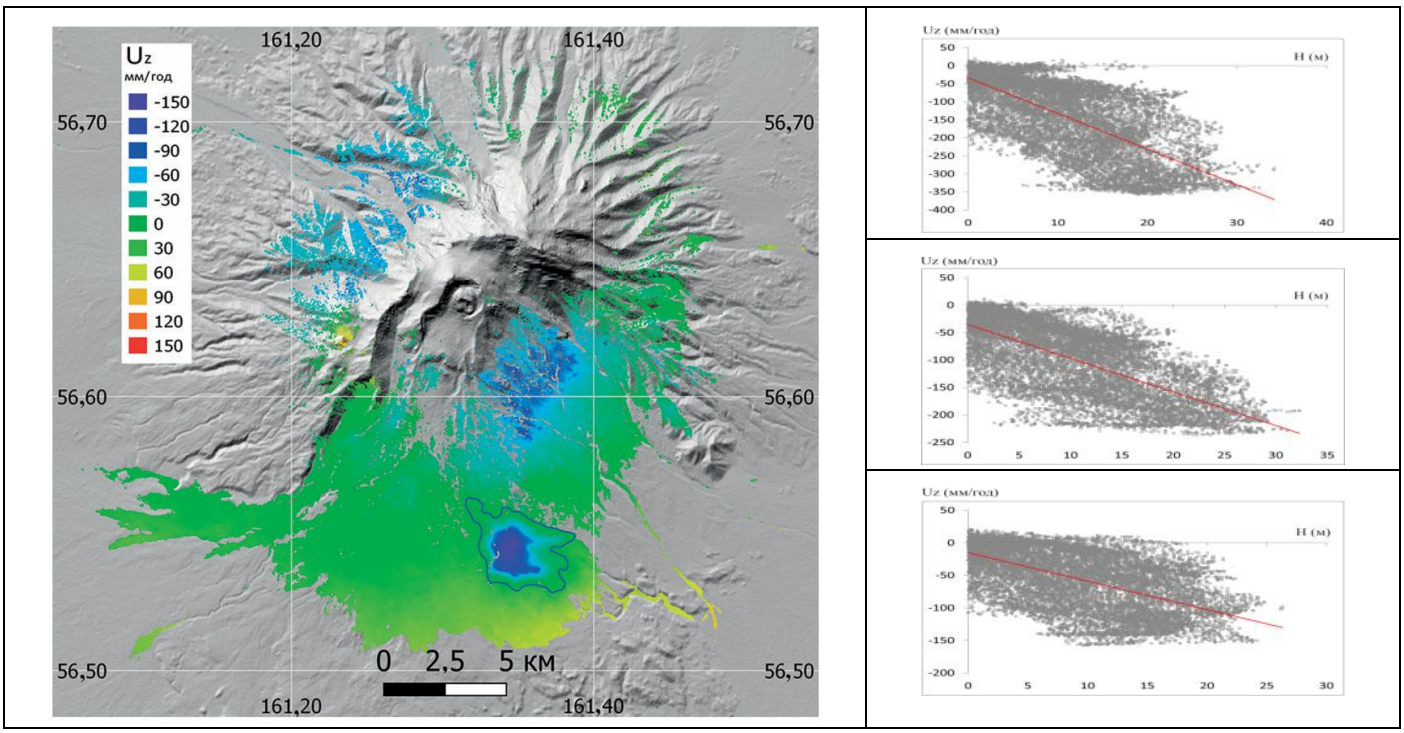


Рисунок 7 – Слева: средняя скорость вертикальных смещений склонов вулкана Шивелуч, мм/год, полученная по снимкам с орбит 60D и 140A за 2022 г. Справа: зависимости скоростей смещений от мощности отложений за 2020, 2021 и 2022 гг. (сверху вниз)

Интерпретация новых данных о средней скорости смещений поверхности пирокластического потока, выполненная с помощью термомеханической модели, разработанной в работе [Волкова, Михайлов, 2022], подтверждает слабый на интервале в 3 года вклад процесса термической усадки в общее оседание отложений потока и существенный вклад процесса компакции вещества, а также эрозионного воздействия. Для разной мощности пирокластических отложений были подобраны параметры модели: изменение пористости во времени и декремент затухания. Согласование со спутниковыми оценками достигается при учёте уменьшения пористости: на 0,97 % для слоя 10 м, на 1,36 % для 15–20 м и на 1,56 % для 25–30 м.

Выводы по главе 3.

Предложенная методика обработки комплекса радарных данных с применением различных методов позволяет использовать данные РСА-интерферометрии в системах постоянного мониторинга вулканических и сейсмических районов в сложных условиях п-ова Камчатка. На примере мониторинга АКГВ показано, что методы интерферометрии – DInSAR, суммирование интерферограмм и SBAS – дополняют друг друга и при совместном использовании помогают верифицировать результаты. Отсутствие деформаций склонов вулканов за восьмилетний период наблюдений (средняя скорость смещений составляет ±10 мм/год) с 2016 по 2024 г. согласуется с отсутствием сильных сейсмических и вулканических событий в регионе.

Мониторинг вулкана Шивелуч в период после его извержения 29.08.2019 по снимкам Sentinel-1A с двух орбит позволил обнаружить область смещений, скорость которых

составляет 150 мм/год за период 2022 года. Область смещений соответствует пирокластическому потоку, распространившемуся во время извержения. Интерпретация с помощью термомеханической модели подтвердила относительно небольшой вклад в оседание отложений процесса термического остывания: от 30 до 60 % для слоя мощностью от 30 до 10 м соответственно. Основной вклад в оседание породы вносит процесс компакции вещества, а также эрозионные процессы.

Результаты главы 3 обосновывают второе защищаемое положение: «Разработанная методика обработки радарных снимков различных спутников с применением комплекса методов РСА-интерферометрии создает основу для постоянного мониторинга вулканов Камчатки. Методика обоснована результатами численных расчетов для района Авачинско-Корякской группы вулканов».

Глава 4 «Разномасштабный мониторинг обширных территорий методами РСА-интерферометрии на примере полуострова Крым»

Представлена методика разномасштабного мониторинга крупных территорий, на которых может быть выявлено множество локальных природных или техногенных процессов. Впервые рассчитано поле средних скоростей смещений Крымского п-ова площадью около 27 тыс. км² за период с 08.01.2020 по 24.12.2024 [1]. Из 146 снимков Sentinel-1A с восходящей орбиты №14 сформированы 683 интерферограммы при ограничениях пространственной базовой линии 150 м и временной — 48 суток. Расчёты выполнены методом SBAS в программном комплексе SARscape с ЦМР AW3D30, поправками GACOS и пространственно-временной фильтрацией остаточной атмосферной компоненты. Геокодирование выполнено на сетку с разрешением 15 м. Для расчёта временных рядов накопленных смещений, содержащих сезонную компоненту, принята линейно-периодическая модель

$$Disp(t) = V_{LOS} \cdot t \ + A_1 \cdot \cos(2\pi F \cdot t + A_2), \qquad (2)$$

где V_{LOS} — средняя скорость смещений за период съёмки, мм/год; A_1 — амплитуда годовой гармоники, мм; A_2 — начальная фаза; F — частота колебаний, в данном случае 1/год; t — время от даты первой съёмки, годы. Модель позволяет отделить линейный тренд от сезонных колебаний и рассматривать не только пространственное распределение средних скоростей, но и характер развития смещений во времени.

Разделение региональной и локальной компонент средних скоростей смещений, выполненное с помощью пространственной медианной фильтрации в радиусе 5 км, позволило выявить тектонические и геологические процессы, а также множество локальных аномальных областей потенциально опасных объектов, связанных с эрозией почвенного слоя, аграрной деятельностью, разработкой карьеров и обрушением их бортов, оползнями, обвалами.

Так, например, область в северной части Крыма имеет в целом отрицательные смещения всей территории со средней скоростью примерно −8,8 мм/год в направлении вектора LOS. Здесь происходит опускание Сивашской впадины, которое проявляется в поле

смещений, полученных методами РСА-интерферометрии. В восточной части Крыма, на территории Керченского полуострова, средняя скорость смещений всего района составляет +5 мм/год (рис. 8а). Здесь начинается грязевулканическая провинция, а также выделяется Керченская надвиговая зона. Вклад в положительные смещения (к спутнику) может вносить эндогенная флюидодинамика, глиняный диапиризм и тектонические смещения висячего крыла надвиговой зоны.

Временные ряды смещений на Южнобережье, рассчитанные по данным РСА-интерферометрии, хорошо согласуются с измерениями на пункте ГНСС в пос. Кацивели (станция KTVL). Получены близкие средние скорости смещений по РСА-интерферометрии и ГНСС за исследуемый период (2020-2024 гг.), которые составили −0,48 и −0,53 мм/год соответственно. Такие скорости согласуются с геологическими данными о незначительном погружении земной поверхности как на пункте KTVL, так и на пункте CRAO, расположенном в 2,84 км на СВ.

Для выявления локальных аномальных областей смещений на фоне региональной компоненты разработан алгоритм автоматизированного поиска. Алгоритм, прежде всего, ориентирован на выявление оползневых процессов на горных склонах и позволяет определить контуры деформационной зоны, геометрические параметры и зональные статистические характеристики используемых в расчёте физических величин.

Краткое описание алгоритма. Исходные данные — результаты обработки серии радарных снимков методом SBAS: карта средних скоростей смещений V_{LOS}, карта точности их оценки σ_v, карта амплитуды сезонной компоненты A_1 и цифровая модель рельефа. Все величины определены в каждом пикселе (i, j) координатной сетки пространства размерности N_x*N_y (N_x = 28797, N_y=16657 пикселей).

На первом шаге для подавления региональной составляющей и повышения контраста рассчитывается остаточная скорость смещений $V_{\mathrm{res}} = V_{\mathrm{LOS}} - v_{\mathrm{m}}$, где v_{m} — медиана средних скоростей в радиусе 5 км вокруг каждого пикселя. Затем отбираются пиксели-кандидаты, у которых остаточная скорость заметно отклоняется от фонового уровня:

$$|V_{res} - m| \geq 3\sigma_v, \tag{3}$$

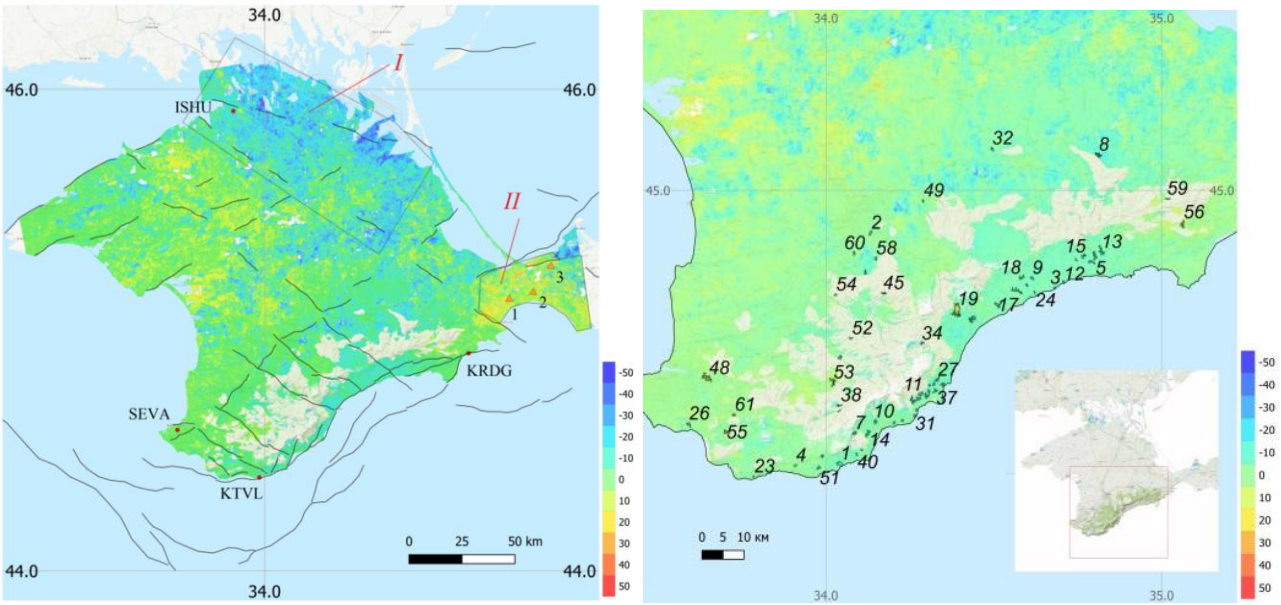
где m — среднее значение распределения V_{res} в радиусе 5 км. Далее отбираются только те пиксели, для которых линейная составляющая тренда преобладает над сезонной компонентой, т.е. выполняется условие:

$$|V_{LOS}|T \geq 1{,}5A_1, \tag{4}$$

где T — длительность всего периода наблюдений, годы. Затем смежные пиксели, находящиеся на расстоянии не более 75 м, объединяются в единые зоны. На заключительном этапе исключаются зоны с медианным углом наклона рельефа менее 5° или площадью менее 0,1 км².

Результатом работы алгоритма является набор объектов в виде полигональных контуров выявленных смещений. В горных районах и Южнобережье был выделен 61 полигон площадью 0,1–2,3 км² (рис. 8б), смещения в пределах которых, после детального ана-

лиза и интерпретации, могут потребовать проведения дальнейшего наземного и спутникового мониторинга.



а б

Рисунок 8 – а) средние скорости смещений поверхности п-ова Крым в направлении LOS, мм/год, за 2020–2024 гг. I — Сивашская впадина; II — Керченский полуостров. Разломы показаны линиями по работе [Бачманов и др., 2017], станции ГНСС — точками с индексами, грязевые вулканы — треугольниками. б) цифрами обозначены выявленные области аномальных смещений

Среди выделенных объектов многие участки приурочены к сельскохозяйственным полям, виноградникам, располагающимся в том числе на склонах холмистой и горной местности, что способствует усилению эрозии почвенного слоя. В таких областях в среднем скорости смещений не превышают 20-24 мм/год (например, области под номерами 6, 14, 25, 30 на рис. 8б). Также выделяются районы, связанные с техногенными процессами, в том числе с разработкой карьеров. Например, на участке разрабатываемого карьера Балаклавского рудоуправления (полигон №26) максимальные скорости смещений вдоль линии LOS составляют –60 мм/год.

Особое внимание следует уделять оползням и обвалам, расположенным в окрестности населённых пунктов, объектов инфраструктуры, туристических маршрутов. Также неравномерное развитие оползневых процессов выявлено непосредственно в населённых пунктах. На рисунке 9 в качестве примеров показаны часть Большой Алупкинской оползневой системы (9а) и Марьинский оползень в г. Симферополе (9б). На временных рядах рис. 9а на фоне сезонной компоненты четко выделяются смещения вниз по склону юго-восточной экспозиции. Смещения происходят постоянно, со средней скоростью −24 мм/год, но начиная с 2023 г. следует отметить некоторое повышение средней скорости смещений. Один из наиболее активных оползневых районов Симферополя – Марьинский оползень – расположен рядом с карьером по добыче глины (полигон №2 на рис. 8б). Максимальная средняя скорость смещений на этом оползне составила −23,5 мм/год (склон

имеет юго-восточную экспозицию, поэтому смещения вниз по склону в направлении LOS отрицательные). При этом на графике накопленных смещений (рис. 9б) видно, что длительное время этот район не был активным, но в декабре 2021 года начали фиксироваться миллиметровые подвижки, затем склон начал терять устойчивость и с 10 марта 2022 до конца периода наблюдений (24.12.2024) смещения развиваются с высокой скоростью, до −41 мм/год. Интенсивные изменения наблюдаются на объекте «Гаспринская свалка» (полигон № 28). Скорость смещения от спутника с 2020 по 2024 год неравномерна: с января 2020 по октябрь 2022 года скорость смещений составила −30,8 мм/год, с октября 2022 по сентябрь 2023 скорость смещения уменьшилась до −21,8 мм/год, а с сентября 2023 по декабрь 2024 – возросла до −64 мм/год, т.е. в три раза по сравнению с предыдущим периодом.

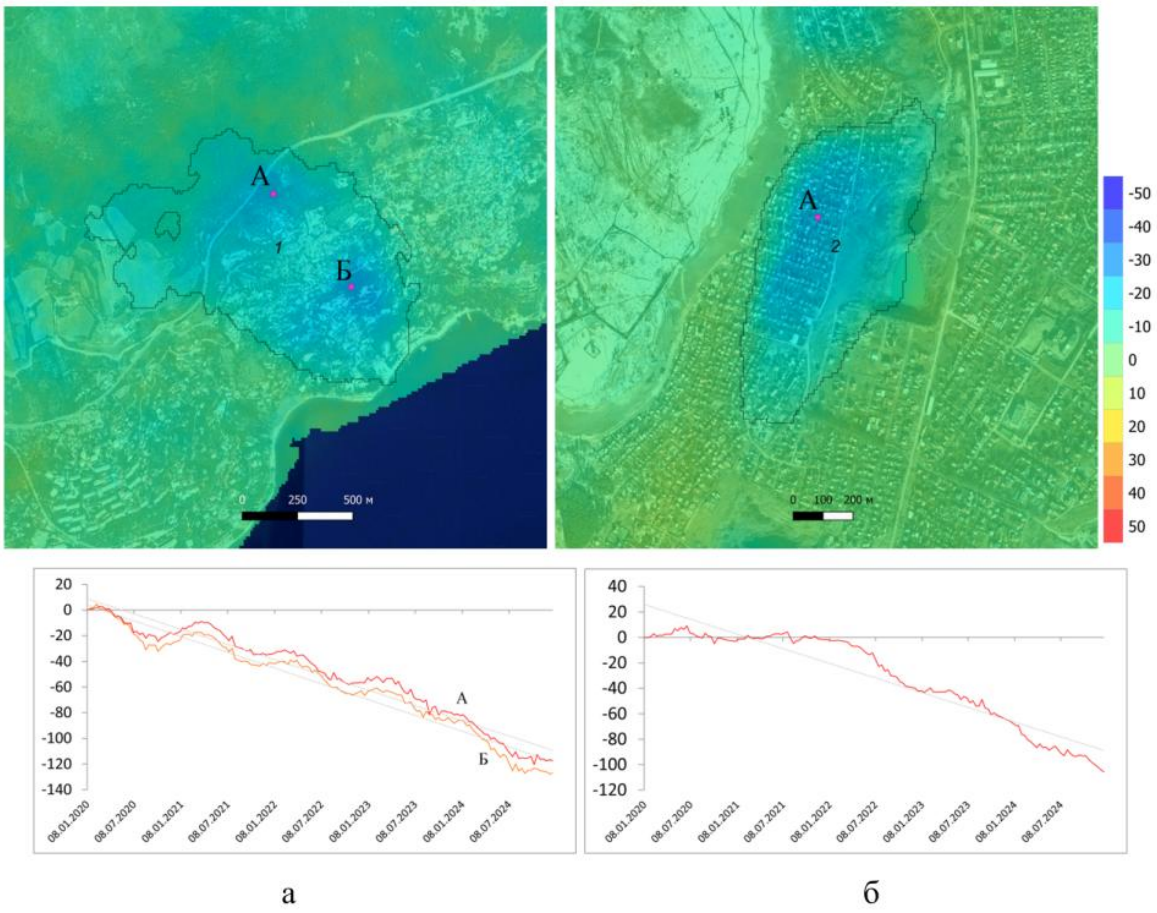


Рисунок 9 – Средние скорости смещений поверхности, мм/год (верхний ряд), и графики временных рядов накопленных смещений, мм (нижний ряд): а) Большая Алупкинская оползневая система, полигон № 1; б) Марьинский оползень рядом с карьером по добыче глины, г. Симферополь, полигон № 2

Выводы по главе 4. Рассчитано региональное поле средних скоростей смещений и локальные временные ряды для всей территории Крыма площадью 27 тыс. км². Получено, что 99 % (3σ) значений средней скорости смещений поверхности меняется в диапазоне от −23 до +23 мм/год. Методика разномасштабного мониторинга позволила выделить региональные тектонические смещения. Так, например, область в северной части Крыма, где

происходит опускание Сивашской впадины, имеет в целом отрицательные смещения всей территории со средней скоростью примерно −8,8 мм/год в направлении вектора LOS. В восточной части Крыма, где выделяется Керченская надвиговая зона, на территории Керченского полуострова, средняя скорость смещений всего района составляет +5 мм/год.

На фоне региональной компоненты с помощью предложенного алгоритма автоматизированного поиска локальных аномальных смещений выявлен 61 потенциально опасный объект, связанный с аграрной деятельностью, разработкой карьеров и обрушением их бортов, оползнями, обвалами.

Результаты главы 4 обосновывают 3-е и 4-е защищаемые положения: «Основанная на совокупности статистических и морфометрических критериев методика разномасштабного анализа интерферометрических полей смещений позволяет автоматизировать процесс выделения связных областей локальных оползневых деформаций склонов относительно регионального медианного фона. Методика обоснована результатами расчета и интерпретации полей смещений для п-ова Крым».

«Впервые построенные карты средних скоростей смещений и временные ряды смещений поверхности полуострова Крым за 2020-2024 гг. позволили выявить области локальных деформаций природного и техногенного происхождения и определить скорости и периоды активизации смещений отдельных оползневых и техногенных объектов».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получили развитие методы оценки и интерпретации полей смещений в сложных природных условиях. Разработанная методика сравнительной оценки атмосферных поправок продемонстрировала свою эффективность в сложных условиях Камчатки. Предложенная методика обработки комплекса радарных данных с применением различных методов позволяет использовать данные РСА-интерферометрии в системах постоянного мониторинга вулканических и сейсмических районов. Применение различных методов оценки смещений помогает верифицировать результаты.

В работе на примере вулкана Шивелуч еще раз продемонстрирована эффективность применения РСА-интерферометрии в изучении активных вулканов, особенно расположенных в удаленных районах.

Результаты, полученные для п-ова Крым, впервые продемонстрировали возможность исследовать и региональные, и локальные поля деформаций. Методы выделения оползневых склонов и их мониторинг могут составить основу систем мониторинга полуострова и других оползневых районов.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Рекомендуются совместный контроль атмосферных поправок по ГНСС и полям смещений, применение взаимодополняющих методов интерферометрии и детальная интерпретация автоматически выделенных аномалий. Дальнейшая работа связана с удлинением временных рядов мониторинга и проверкой применимости разработанных подходов на других территориях со сложными природными условиями.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, и изданиях, входящих в международные базы данных:

1. Османов Р.С., Волкова М.С., Михайлов В.О. Выявление и анализ разномасштабных полей смещений методами РСА-интерферометрии на примере полуострова Крым // Физика Земли. – 2026. – № 3. – С. 85–99. – DOI 10.7868/S3034645226030072.

2. Волкова М.С., Михайлов В.О., Османов Р.С. Интерпретация полей смещений на склонах вулкана Шивелуч (Камчатка), полученных по спутниковым радарным снимкам с двух орбит // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20, № 5. – С. 109–119. – DOI 10.21046/2070-7401-2023-20-5-109-119.

3. Волкова М.С., Михайлов В.О., Османов Р.С. Анализ эффективности применения глобальной погодной модели HRES (GACOS) для коррекции атмосферных помех в интерферометрических оценках полей смещений на примере вулканов Камчатки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21, № 2. – С. 9–22. – DOI 10.21046/2070-7401-2024-21-2-9-22.

4. Волкова М.С., Михайлов В.О., Османов Р.С. О некоторых методических вопросах мониторинга вулканических районов Камчатки по данным спутниковой радиолокационной интерферометрии на примере Авачинско-Корякской группы // Геофизические исследования. – 2026. – Т. 27, № 1. – С. 5–22. – DOI 10.21455/gr2026.1-1.

5. Волкова М.С., Михайлов В.О., Османов Р.С. Оценка точности моделей атмосферных фазовых задержек для полей смещений на территории Камчатки, рассчитанных методом дифференциальной интерферометрии // Исследование Земли из космоса. – 2025. – № 3. – С. 3–12. – DOI 10.7868/S3034540525030014.

6. Волкова М.С., Михайлов В.О., Османов Р.С. Сравнение моделей атмосферных поправок к данным спутниковой интерферометрии для территории Камчатки // Исследование Земли из космоса. – 2025. – № 3. – С. 13–25. – DOI 10.7868/S3034540525030027.

Подписано в печать «___» _____ 20__ г. Формат издания _____.
Объём _____ усл. печ. л. Тираж _____ экз. Заказ № _____.
Печать: _____ (наименование и адрес полиграфической организации).