

Анализ эффективности применения глобальной погодной модели HRES (GACOS) для коррекции атмосферных помех в интерферометрических оценках полей смещений на примере вулканов Камчатки

М. С. Волкова, В. О. Михайлов, Р. С. Османов

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, 123242, Россия

E-mail: msvolkova6177@gmail.com

Исследуется актуальная проблема устранения фазовых атмосферных задержек при расчёте полей смещений методом дифференциальной интерферометрии (*англ.* Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar — DInSAR) по спутниковым радиолокационным снимкам территории Камчатки. Выполнено тестирование модели атмосферной поправки GACOS (*англ.* Generic Atmospheric Correction Online Service) с использованием погодной модели HRES (*англ.* High Resolution) для коррекции полей смещений, полученных по снимкам спутника Sentinel-1A вулканических районов северной, центральной и южной Камчатки (вулканы Толбачик, Мутновский–Горелый, Карымский вулканический центр, Авачинско-Корякская группа вулканов). По статистическим оценкам эффективности введённых атмосферных поправок, положительный результат наблюдался для 63,3 % интерферограмм. Тропосферная компонента при этом удаляется если не полностью, то в значительной степени, в то время как турбулентная компонента остаётся в скорректированных результатах без изменений вместе с деформационной составляющей. В работе использованы статистические критерии (изменение в результате коррекции дисперсии поля смещений, коэффициента его корреляции с топографией, пространственного тренда), позволяющие оценить эффективность введения поправок. Для скорректированных полей смещений максимальная стандартная ошибка уменьшилась с 0,022 до 0,011 м. В некоторых случаях вычитание атмосферной поправки ухудшало значения статистических критериев. В целом, учитывая экстремальные для спутниковой радарной интерферометрии условия Камчатского региона (погода, рельеф, невысокая когерентность природных ландшафтов, низкое отношение сигнал/шум на интерферограммах), при положительном статистическом эффекте от введённой поправки погодную модель HRES (GACOS) рекомендуется применять при использовании методов дифференциальной интерферометрии для данной территории.

Ключевые слова: радарная спутниковая интерферометрия, PCA, Sentinel-1A, погодные модели, HRES, GACOS, атмосферные помехи, фазовые задержки, вулканы, Камчатка

Одобрена к печати: 27.02.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-9-22

Введение

Одной из областей широкого применения методов спутникового дистанционного зондирования Земли является мониторинг и изучение вулканических и сейсмоопасных районов, из которых к числу наиболее активных относится Курило-Камчатская зона субдукции. Эффективным методом изучения вулканических событий представляется спутниковая радиолокационная интерферометрия, позволяющая фиксировать различные подвижки земной поверхности, в частности обвалы, оползни, деформации склонов вулканов, связанные как с экзогенными, так и с эндогенными процессами. В отличие от оптической съёмки, съёмка, выполненная спутниковыми радарными с синтезированной апертурой (РСА), эффективна практически при любых погодных условиях. При этом важна когерентность фазовых изображений. Когерентность — основная характеристика, определяющая возможность расчёта поля смещений, которая отражает коррелированность фазы радарного сигнала двух снимков в окрестности каждого пикселя. Низкая когерентность обусловлена возмущённым состоянием атмосферы, поверхностями с низкой отражательной способностью и событиями, резко

меняющими ландшафт: выпадением снега, активным ростом растений, сходом ледников, оползней, обвалами в горных районах и т. д.

Смещения в РСА-интерферометрии определяются по разности фаз электромагнитного сигнала, излучаемого радаром и отражённого от одной и той же поверхности в разные моменты съёмки. При этом разность фаз $\Delta\varphi$ включает смещения отражающей площадки, различного рода помехи, в том числе термические шумы, ошибки рельефа, неточность орбиты и влияние атмосферы (Hooper et al., 2004):

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

Чтобы выделить компоненту смещений $\Delta\varphi_{def}$, необходимо устранить остальные четыре составляющие. Три из них ($\Delta\varphi_{noise}$, $\Delta\varphi_{topo}$, $\Delta\varphi_{orb}$) устраняются достаточно надёжно. Шумы и помехи $\Delta\varphi_{noise}$ подавляются операцией некогерентного осреднения, при котором объединяются соседние элементы по дальности и азимуту, вследствие чего получается сглаженное изображение, и применением различных фильтров (см. например, работы (Baran et al., 2003; Deledalle et al., 2010, 2011; Goldstein, Werner, 1998)). Разность фаз $\Delta\varphi_{topo}$, связанная с остатком после вычитания известной с определённым приближением цифровой модели рельефа (ЦМР) (например, SRTM (*англ.* Shuttle Radar Topography Mission — радиолокационная топографическая миссия шаттла), AW3D30 (*англ.* ALOS World Global Digital Surface Model), TDM90 (*англ.* TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement — TanDEM-X) и др.), устраняется с помощью контрольных точек и пространственных фильтров. Для уменьшения орбитальной компоненты $\Delta\varphi_{orb}$ используют точные орбиты, получаемые из базы данных Европейского космического агентства (ЕКА, *англ.* European Space Agency — ESA) для спутника Sentinel-1, а также с помощью контрольных точек или низкочастотной фильтрации в остальных случаях. Устранение атмосферной помехи $\Delta\varphi_{atm}$ до сих пор остаётся нерешённой в общем виде критической проблемой в интерферометрии, в частности в методе DInSAR (*англ.* Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar).

На прохождение электромагнитного сигнала через атмосферу оказывают влияние тропосфера и ионосфера. И если ионосфера слабо искажает излучение в коротковолновых диапазонах, особенно в ночное время, то тропосфера, напротив, вносит существенные искажения в результаты определения смещений по снимкам коротковолновых спутников, в том числе Sentinel-1A, при этом влияние тропосферных эффектов возрастает с уменьшением длины волны радиолокатора. Важным свойством тропосферы является содержание водяного пара, количество которого приводит к изменению скорости распространения радиоволн. Чем больше длина волны, тем меньше её скорость подвержена затуханию во влажной среде.

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) обуславливают трёхмерную неоднородность атмосферы во всём её объёме. Таким образом, вклад атмосферы $\Delta\varphi_{atm}$ можно разделить на составляющие двух типов: стратифицированную и турбулентную компоненты (Hanssen, 2001). Турбулентная компонента проявляется как на горном рельефе, так и на равнинной местности, а стратифицированная — только в горных районах.

Известно, что вариации состояния атмосферы могут вносить существенный вклад в разность фаз $\Delta\varphi$, завышая или занижая оценки смещений земной поверхности. Этим объясняется большое внимание, которое уделяется мировым сообществом развитию различных подходов к введению атмосферных поправок.

Можно выделить три основных подхода к коррекции атмосферных ошибок:

1. Алгоритмические методы фазовой коррекции, к которым относятся суммирование интерферограмм и применение различных фильтров. Эти методы основаны на анализе пространственно-временных свойств принятого радарного сигнала и разделении тропосферного шума и деформационной составляющей. Дополнительная информация при этом не используется (Ferretti et al., 2001). Этот подход может приводить к потере полезного сигнала, вызванного медленными деформационными процессами.

2. Корреляционный анализ фазы и топографии в региональном масштабе (Beauducel et al., 2000; Bekaert et al., 2015) и анализ корреляций разности фаз во времени для поиска атмосферных артефактов в локальном масштабе (Chaabane et al., 2007). Однако такой подход не убирает турбулентную компоненту.
3. Применение моделей, включающих дополнительные данные, такие как численные модели погоды (*англ.* Numerical Weather Models — NWM) (Doin et al., 2009; Parker et al., 2015; Yu et al., 2018) или прямые наблюдения — данные спектрометров MERIS (*англ.* MEdium Resolution Imaging Spectrometr) или спектрорадиометров MODIS (*англ.* MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) (Li et al., 2009). Погодные модели имеют низкое временное и/или пространственное разрешение, не фиксируют турбулентность, а прямые наблюдения зависят от облачности.

В работах (Yu et al., 2017a, b, 2018) сделана попытка решить проблемы, связанные с недостатками перечисленных выше подходов к вычислению атмосферных помех, объединением данных погодной модели и наблюдений на пунктах GPS (*англ.* Global Positioning System). Для этого был разработан алгоритм разделения атмосферной помехи на турбулентную и стратифицированную компоненты (*англ.* Iterative Tropospheric Decomposition — ITD) (Yu et al., 2017a, b). Основанный на этом подходе онлайн-сервис расчёта атмосферных поправок для РСА-интерферометрии GACOS (*англ.* Generic Atmospheric Corrections Online Service) предоставляет возможность получить карты зенитных абсолютных фазовых задержек (м) на любую территорию и дату радарной съёмки. Модели GACOS используют преимущества двух разных источников данных: 1) станций GPS, которые имеют высокую точность измерений, обеспечивают высокое разрешение по времени и фиксируют локальные особенности турбулентности при любой погоде; 2) погодной модели, в качестве которой выбрана улучшенная модель высокого разрешения HRES (*англ.* High Resolution) Европейского центра среднесрочного прогноза погоды (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecast — ECMWF), обеспечивающая высокое пространственное разрешение и равномерное распределение данных.

Во многих работах проводилось сравнение эффективности применения карт атмосферных задержек GACOS и других численных погодных моделей в разных климатических регионах (Biggs et al., 2021; Darvishi et al., 2020; Stephens et al., 2020; Wang et al., 2021; Yu et al., 2017a, 2018 и многие др.). В итоге отмечено, что в большинстве случаев модель GACOS в среднем демонстрирует лучшие результаты, как показано, например, в работе (Darvishi et al., 2020) при исследовании оползня Корвара в Альпах, или (Wang et al., 2021) при изучении землетрясений на Тибетском плато, или (Murray et al., 2019), где исследуются различные процессы в центральной части США и южной части Мексики. Эти исследования проведены в районах с разными атмосферными характеристиками. Тем не менее ни одна модель не смогла полностью устранить фазовые задержки (Darvishi et al., 2020). Более того, в работе (Stephens et al., 2020) при исследовании вулканов в Никарагуа сообщается, что вместо того, чтобы снизить атмосферные помехи, модели зачастую вносили дополнительные погрешности в скорректированные результаты. Кроме того, в работе (Yu et al., 2018) проводился анализ модели GACOS в тех районах Тибета, Непала, Исландии и Алжира, где отсутствуют станции GPS. Было показано, что с помощью модели погоды HRES-ECMWF на крутом рельефе (Непал, Тибет) атмосферные ошибки не могут быть полностью устранены. Неустранённая погрешность содержит как турбулентную составляющую, так и компоненту, коррелирующую с рельефом.

В данной работе мы исследуем эффективность применения карт абсолютных тропосферных фазовых задержек онлайн-сервиса GACOS для коррекции полей смещений, полученных по снимкам спутника Sentinel-1A на вулканические районы Камчатки с особо сложными погодными условиями.

Данные и методы исследования

Наши исследования проведены для вулканов Южной, Центральной и Северной Камчатки: влк. Мутновский — Горелый, Авачинско-Корякской группы вулканов (АКГВ), Карымского

вулканического центра и влк. Толбачик (рис. 1). В рамках мониторинга и изучения вулканических процессов Камчатки были рассчитаны поля смещений за 2022 г. по радиолокационным снимкам спутника Sentinel-1A (ЕКА), который проводит съёмку в С-диапазоне (длина волны $\lambda = 56$ мм) с интервалом 12 дней и размером пикселя в наземных координатах примерно 5×20 м по дальности и по азимуту соответственно. Мы использовали снимки с 60-й нисходящей орбиты, поскольку они покрывают значительную часть территории Камчатки за один виток и выполнены практически в одно и то же время (примерно в 19:40 UTC (англ. Coordinated Universal Time, всемирное координированное время)).



Рис. 1. Снимки спутника Sentinel-1A (прямоугольники; цифрами подписаны номера фреймов). Треугольниками показаны вулканы, исследованные в работе

Таблица 1. Снимки спутника Sentinel-1A, выполненные с 60-й орбиты с мая по октябрь 2022 г. на вулканические районы исследования (указано время съёмки по UTC)

Толбачик	Карымский	АКГВ	Мутновский
24.05.2022, 19:40:15,671	—	—	—
05.06.2022, 19:40:17,057	—	—	—
17.06.2022, 19:40:17,544	17.06.2022, 19:40:42,367	17.06.2022, 19:41:07,190	17.06.2022 19:41:32,021
29.06.2022, 19:40:18,331	29.06.2022, 19:40:43,156	29.06.2022, 19:41:07,991	29.06.2022 19:41:32,808
11.07.2022, 19:40:19,033	11.07.2022, 19:40:43,860	11.07.2022, 19:41:08,685	11.07.2022 19:41:33,506
04.08.2022, 19:40:20,652			
16.08.2022, 19:40:21,343	16.08.2022, 19:40:46,168	16.08.2022, 19:41:10,997	16.08.2022, 19:41:35,824
28.08.2022, 19:40:21,753	28.08.2022, 19:40:46,578	28.08.2022, 19:41:11,399	28.08.2022, 19:41:36,226
09.09.2022, 19:40:22,604	09.09.2022, 19:40:47,427	09.09.2022, 19:41:12,256	09.09.2022, 19:41:37,083
21.09.2022, 19:40:21,713	21.09.2022, 19:40:46,535	21.09.2022, 19:41:11,367	21.09.2022, 19:41:36,198
03.10.2022, 19:40:22,851	03.10.2022, 19:40:47,678	03.10.2022, 19:41:12,505	03.10.2022, 19:41:37,336

Экстремальные погодные условия Камчатки, снежный покров, который залегает по восемь месяцев в году, частые туманы и затяжные дожди значительно ограничивают выбор радарных снимков, в основном периодом с мая по октябрь. Кроме того, съёмка спутником Sentinel-1A с 60-й орбиты в 2022 г. велась с перебоями (табл. 1). В результате в период с мая по октябрь на южный и центральный районы Камчатки было получено по 8 снимков, на северный район — 11 снимков. Малый набор радиолокационных данных также накладывает ограничения на выбор методов обработки. Возможность применения более точных методов (например, SBAS — *англ.* Small Baseline Subset или PS — *англ.* Persistent Scatterers) требует наличия существенно большего количества снимков в серии.

Обработка снимков на все исследуемые территории проводилась в программном комплексе SARscape методом дифференциальной интерферометрии (DInSAR). Суммарно было рассчитано 30 интерферограмм: по семь на районы вулканических массивов Мутновский, АКГВ, Карымский и девять интерферограмм на район влк. Толбачик. Снимок, выполненный 03.10.2022 на северную часть Камчатки, где расположен Толбачик, не вошёл в расчёты по причине низкой когерентности. Расчёт интерферограмм выполнялся с некогерентным осреднением в направлении, перпендикулярном орбите. Поскольку относительные фазовые значения интерферограммы лежат в диапазоне $[-\pi; +\pi]$, то для получения абсолютной фазы необходимо восстановить полное число фазовых циклов в каждом пикселе, т. е. выполнить операцию, называемую развёрткой фазы.

Перед процедурой развёртки фазы выполнялась фильтрация короткопериодных шумов и помех (Baran et al., 2003; Goldstein, Werner, 1998). Развёртка проводилась на триангуляционной сетке стандартным алгоритмом «потока наименьшей стоимости» для пикселей с когерентностью выше 0,3. При геокодировании (пересчёте фазы из радарных координат в географические и переводе из радиан в метры) для сокращения зашумлённых областей устанавливался порог когерентности 0,45–0,5. Такая стратегия обработки основана на нашем опыте работ в данном регионе.

Почти на всех полученных дифференциальных интерферограммах можно было наблюдать пространственный тренд, не связанный с деформациями земной поверхности, и локальные атмосферные эффекты. Пространственный тренд различного простираения, близкий к линейному, может быть вызван как атмосферной стратификацией (атмосферный экран), так и ошибками в орбитальных данных (Hanssen, 2001).

Далее решалась задача учёта атмосферных поправок, основанных на погодной модели последнего поколения HRES (GACOS), при расчёте полей смещений. Пространственное разрешение модели HRES составляет $0,125^\circ$ (~12–14 км) по горизонтали, 137 уровней давления по вертикали, разрешение по времени составляет 6 ч.

Поскольку фазовые задержки рассчитываются вдоль зенита, а РСА-интерферометрия позволяет определять смещения в направлении распространения электромагнитного сигнала (*англ.* Line Of Sight — LOS), то с использованием угла отклонения радарного луча от вертикали (θ) для каждого пикселя радиолокационного снимка все задержки были пересчитаны на направление LOS. Обозначим смещения, полученные на основе разности фаз (1), как $U_{LOS} = F(\varphi)$, где F — оператор обработки фазовых изображений, включая получение геокодированных смещений, м; Ψ_{atm} — разность атмосферных фазовых задержек для рассматриваемой интерферограммы, полученных по данным GACOS. Тогда разность фазовых задержек в направлении LOS (Ψ_{atm}^{LOS}) и скорректированные смещения (U_{cor_LOS}) будут равны соответственно:

$$\Psi_{atm}^{LOS} = \frac{\Psi_{atm}}{\cos(\theta)}, \quad U_{cor_LOS} = F(\varphi) - \Psi_{atm}^{LOS}. \quad (2)$$

Эффективность применения поправки оценивалась с помощью статистик. Рассматривались такие показатели, как относительное изменение общей дисперсии $\delta_{Var} = \frac{Var(U_{LOS}) - Var(U_{cor_LOS})}{Var(U_{LOS})} \times 100\%$, коэффициент корреляции (Пирсона) поля смеще-

ний с топографией до и после коррекции (C и C_{cor}), а также наличие пространственного тренда до коррекции поля смещений и после коррекции, определяемого как коэффициент корреляции значений смещений и расстояния вдоль четырёх направлений: С–Ю (север–юг), З–В (запад–восток), СЗ–ЮВ (северо-запад–юго-восток) и ЮЗ–СВ (юго-запад–северо-восток).

Результаты исследования

Как уже было сказано, практически на всех интерферограммах наблюдаются атмосферные помехи, включающие турбулентную и стратифицированную компоненты.

При введении поправки в расчётное поле смещений улучшением результата будем считать положительное значение изменения дисперсии ($\delta_{Var} > 0$) и снижение коэффициента корреляции между смещениями и топографией. Положим, что зависимость поля смещений от топографии несущественная, если коэффициент корреляции не превышает порогового значения 0,3. На рис. 2 показаны диаграммы этих двух параметров, отложенных по горизонтальной и вертикальной оси соответственно. Каждой интерферограмме соответствует пара точек с одинаковым значением изменения дисперсии: синий и красный маркер. При этом синий маркер отражает коэффициент корреляции фазы и топографии до введения поправки, красный — после. Прямоугольником выделены интерферограммы, у которых корреляция с топографией меньше или равна 0,3.

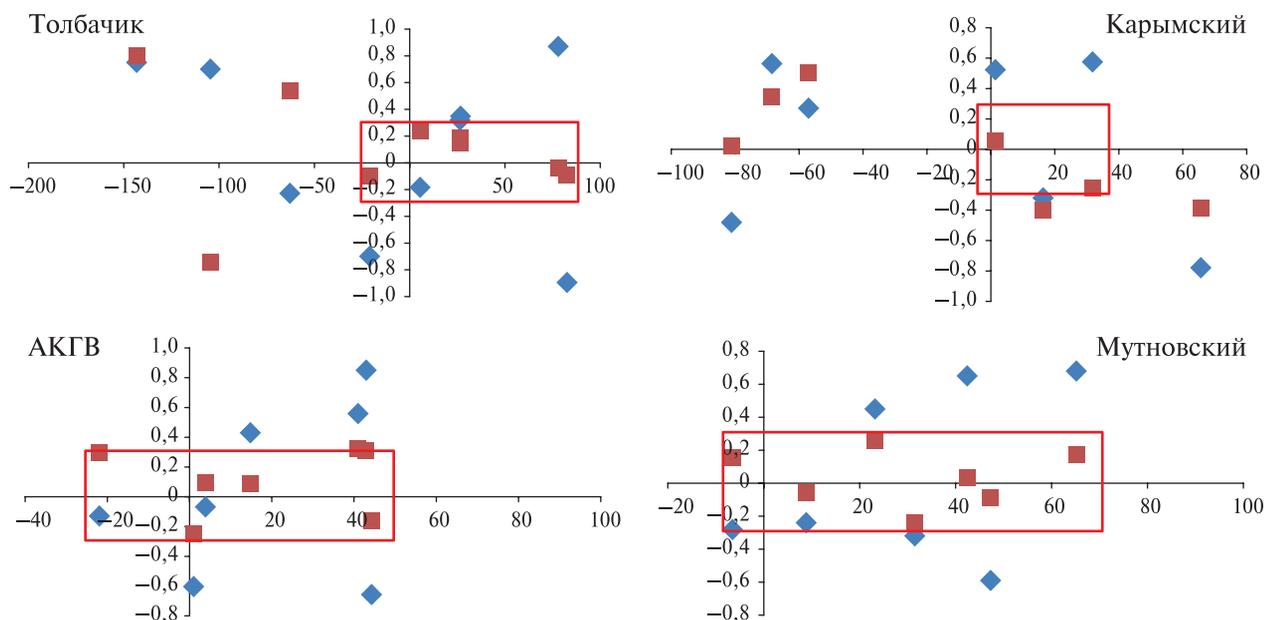


Рис. 2. Результаты вычитания атмосферных поправок для каждой интерферограммы. Горизонтальная ось — относительное изменение дисперсии (%) в поле смещений после коррекции атмосферных фазовых задержек (шкалы различны для различных вулканов). Вертикальная ось — коэффициент корреляции фазы и топографии; синие ромбы — до коррекции на атмосферные эффекты, красные квадраты — после коррекции. Прямоугольником выделена область с коэффициентом корреляции фазы и топографии, не превышающим 0,3

Как видно из рис. 2, введение поправки не для всех интерферограмм дало положительный эффект. Формально наилучший результат достигнут для района влк. Мутновский, где почти все интерферограммы (шесть из семи) имеют положительные величины относительного изменения дисперсии от 8 до 65 %, что соответствует уменьшению шума в данных. Коэффициент корреляции фазы с топографией для всех скорректированных смещений не превышает 0,3, что соответствует принятому нами критерию устранения стратифициро-

ванной компоненты в поле смещений. Только для одной интерферограммы, посчитанной по снимкам от 17.06.2022 и 29.06.2022 (фрейм 419), дисперсия изменилась на -6% , что говорит о небольшом усилении шума.

Похожий результат получен для района вулканов Авачинско-Корякской группы, где также почти все интерферограммы (шесть из семи) скорректированы с положительным эффектом: δ_{Var} от 1 до 44%. Исключение составила интерферограмма по тем же датам, что и для влк. Мутновский (от 17.06.2022 и 29.06.2022, фрейм 414), для которой относительная величина изменения дисперсии составила -22% .

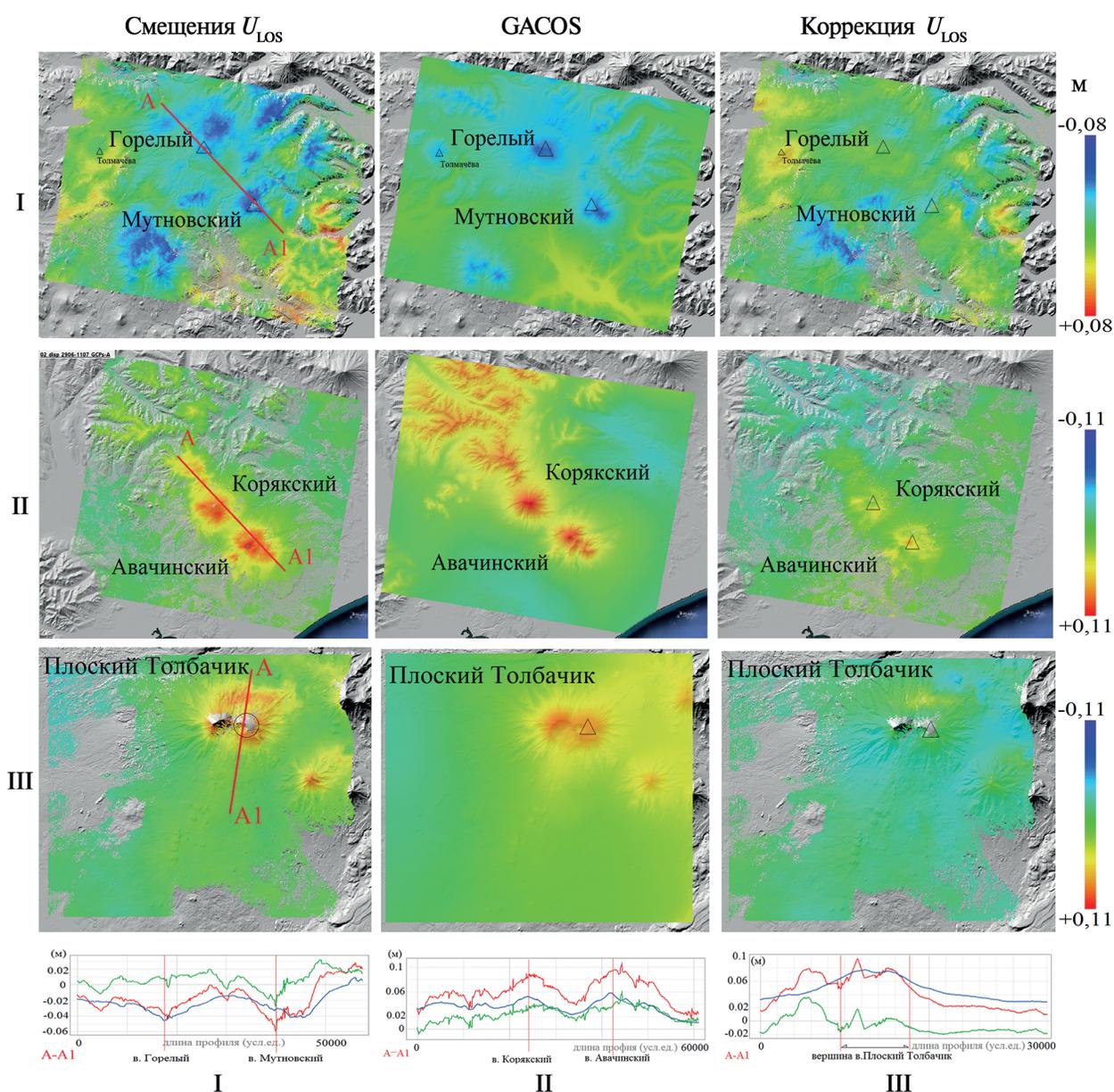


Рис. 3. Примеры применения атмосферной поправки GACOS для разных вулканических районов: I — влк. Мутновский (28.08–09.09.2022); II — АКГВ (29.06–11.07.2022); III — влк. Толбачик (16–28.08.2022). На профилях под рисунками показаны значения вдоль линий $A-A_1$, обозначенных на картах слева: красный цвет — исходные смещения U_{LOS} , синий — атмосферные фазовые задержки GACOS, зелёный — скорректированные значения смещений

В районе влк. Карымский получено только два удовлетворительных результата из семи с улучшением точности на 1,4 и 31%. В районе влк. Толбачик пять из девяти скорректи-

рованных смещений получены с улучшением от 5 до 82 %. В некоторых случаях введённые поправки значительно увеличили уровень шума. Максимум изменения дисперсии достиг -143% и относится к полю смещений влк. Толбачик, рассчитанному из интерферограммы по снимкам 17.06.2022 и 29.06.2022 (фрейм 404).

Итак, по статистическим оценкам, после введения фазовой атмосферной поправки «уточнение» полей смещений, удовлетворяющее условию $\delta_{Var} > 0$ и $C_{cor} \leq 0,3$, получено в 19 случаях из 30, т. е. в 63,3 % интерферограмм.

На примерах, приведённых на *рис. 3* (см. с. 15), несмотря на хорошие показатели статистик, видно, что для вулканов Мутновский ($\delta_{Var} = 47\%$, $C_{cor} = -0,09$) и Толбачик ($\delta_{Var} = 78\%$, $C_{cor} = -0,04$) на скорректированных интерферограммах всё ещё сохраняется турбулентная компонента, которая также может скрывать деформационную составляющую. Для влк. Карымский ($\delta_{Var} = 48\%$) стратифицированная компонента значительно сгладилась, но тем не менее осталась заметная корреляция смещений с топографией. Коэффициент корреляции при этом снизился с 0,91 до 0,45. Вдоль профилей, обозначенных линиями ($A-A_1$) на картах исходных полей смещений, показаны значения исходных смещений (красный график), атмосферных фазовых задержек (синий), скорректированных смещений (зелёный). Отклонение полученных результатов до вычитания атмосферной поправки от реальных смещений составляло примерно от $-0,06$ до $+0,1$ м.

Рассмотрим наилучшие результаты коррекции поля смещений ($\delta_{Var} = \max$; $C_{cor} \leq 0,3$) для каждого исследуемого вулканического района (*табл. 2*).

Таблица 2. Наилучший результат коррекции поля смещений для каждого исследуемого района по статистическому критерию $\delta_{Var} = \max$; $C_{cor} \leq 0,3$

	Дата съёмки (номер фрейма)	δ_{Var} , %	C	C_{cor}
Мутновский	29.06–11.07.2022 (419)	65	0,68	0,17
АКГВ	28.08–09.09.2022 (414)	44	-0,66	-0,16
Карымский	29.06–11.07.2022 (409, 414)	31	0,57	-0,26
Толбачик	28.08–09.09.2022 (404)	82	-0,89	-0,09

На *рис. 4* (см. с. 17) показаны результаты для пар снимков, приведённых в *табл. 2*. По коэффициенту корреляции в этой таблице видно, что стратифицированная помеха устранилась очень хорошо. Но также есть отличные от нуля локальные фрагменты, вопрос о природе которых может быть решён с использованием дополнительных сейсмологических и полевых вулканологических данных об активности исследуемых вулканов. На профилях под рисунками показаны значения исходных смещений, атмосферных задержек и скорректированных смещений, полученных вдоль линии ($A-A_1$), обозначенной на картах смещений U_{LOS} . Обращает на себя внимание, что в некоторых случаях весь полученный сигнал совпадает с сигналом атмосферной помехи (например, влк. Карымский).

Отрицательные результаты коррекции связаны с несоответствием погодной модели полю смещений до введения поправки. Такое несоответствие определяется по отсутствию корреляции расчётного поля смещений и атмосферной поправки (*рис. 5*, см. с. 18). Возможные причины несоответствия модели заключаются в следующем: турбулентная компонента значительно превосходит стратифицированную компоненту и/или модель содержит полиномиальный тренд (обычно первой или второй степени), которого нет в поле расчётных смещений, например из-за резкой смены погодных условий, которая часто происходит на камчатских вулканах.

На *рис. 6а* (см. с. 18) показан пример коррекции для влк. Толбачик. Атмосферная поправка (синяя линия) может быть хорошо аппроксимирована полиномом третьей степени с величиной достоверности аппроксимации 0,9992. Эта поправка создала тренд в скорректированном поле смещений (зелёная линия) и привела к максимально отрицательному результату с изменением относительной дисперсии -143% . На *рис. 6б* показан пример коррекции

для влк. Карымский. Профиль атмосферной поправки (синяя линия) здесь условно можно рассматривать как огибающую по вершинам горного рельефа. Расхождение атмосферной поправки с полем расчётных смещений (серая кривая) между вершинами гор на пологом рельефе, скорее всего, связано с тем, что погодная модель HRES с разрешением 12 км была интерполирована на более мелкую пространственную сетку. В этом примере изменение относительной дисперсии составило -81% .

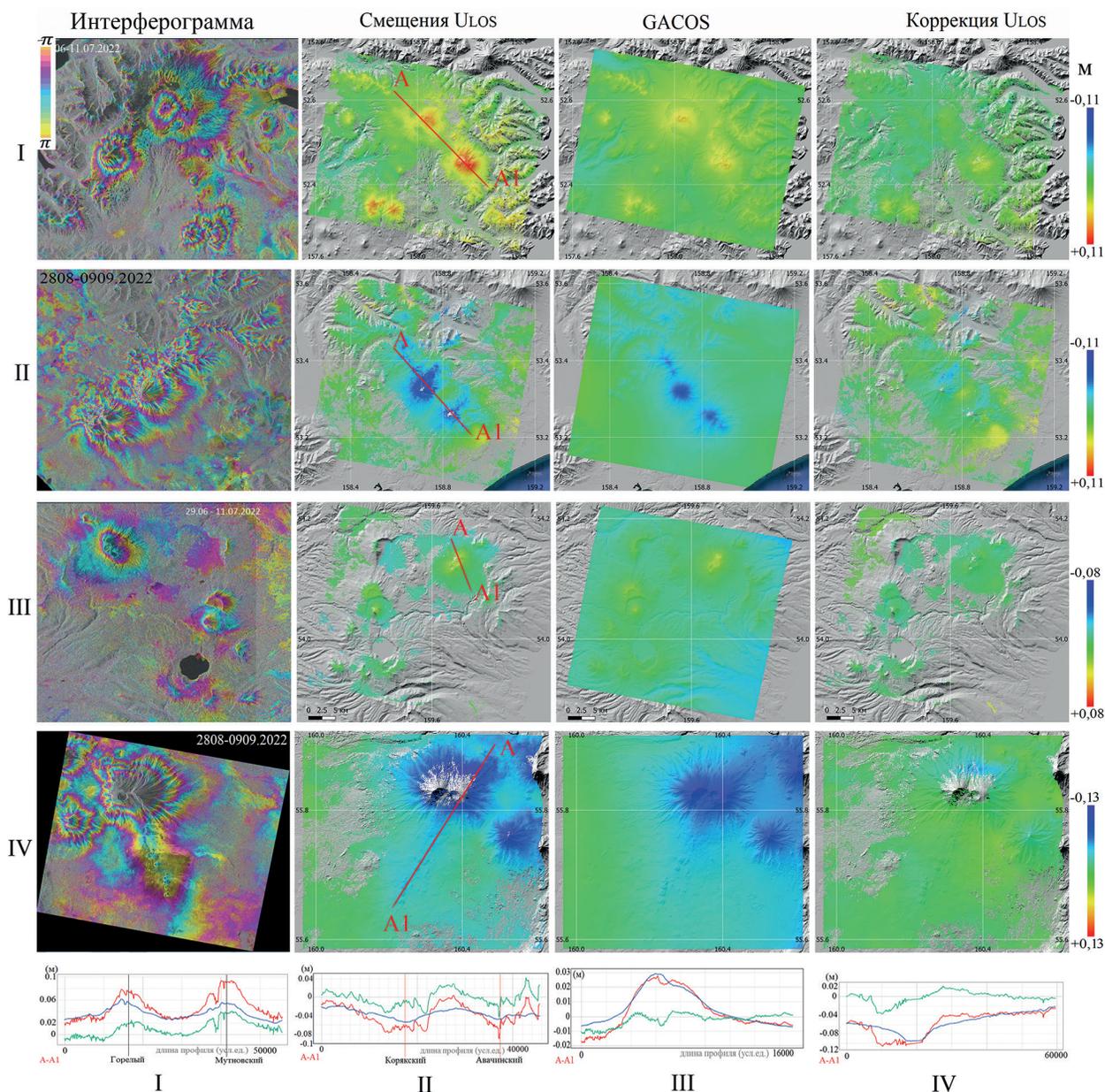


Рис. 4. Наилучший результат коррекции поля смещений (м) для каждого исследуемого района по статистическому критерию $\delta_{Var} = \max; C_{cor} \leq 0,3$. I — влк. Мутновский (29.06–11.07.2022); II — АКГВ (28.08–09.09.2022); III — влк. Карымский (29.06–11.07.2022); IV — влк. Толбачик (28.08–09.09.2022). В первом столбце — интерферограмма в радиометрических координатах (для нисходящей орбиты запад — справа, восток — слева). Вдоль профилей, обозначенных линиями на картах с исходными смещениями, показаны значения смещений U_{LOS} (красный график), атмосферных задержек (синий), скорректированных смещений (зелёный)

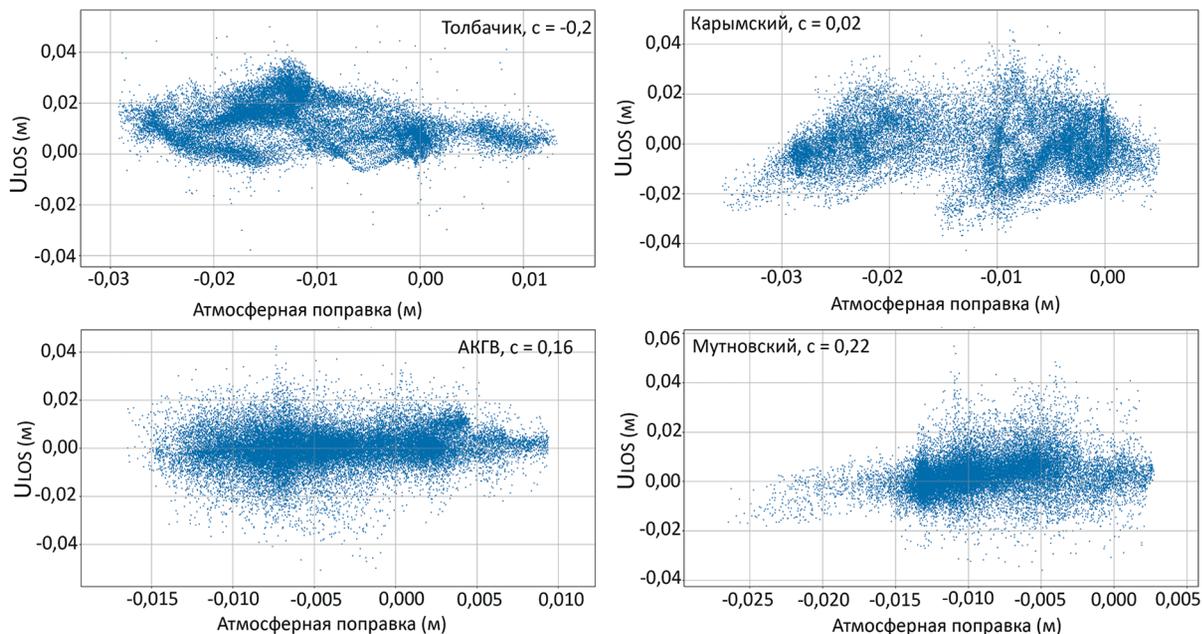


Рис. 5. Отсутствие корреляции поля расчётных смещений и атмосферной поправки для случаев с максимальным увеличением дисперсии в поле смещений (c — коэффициент корреляции): влк. Толбачик, 17–29.06.2022 ($\delta_{Var} = -143\%$); влк. Карымский, 28.08–09.09.2022 ($\delta_{Var} = -81\%$); АКГВ, 17–29.06.2022 ($\delta_{Var} = -22\%$); влк. Мутновский, 17–29.06.2022 ($\delta_{Var} = -6\%$)

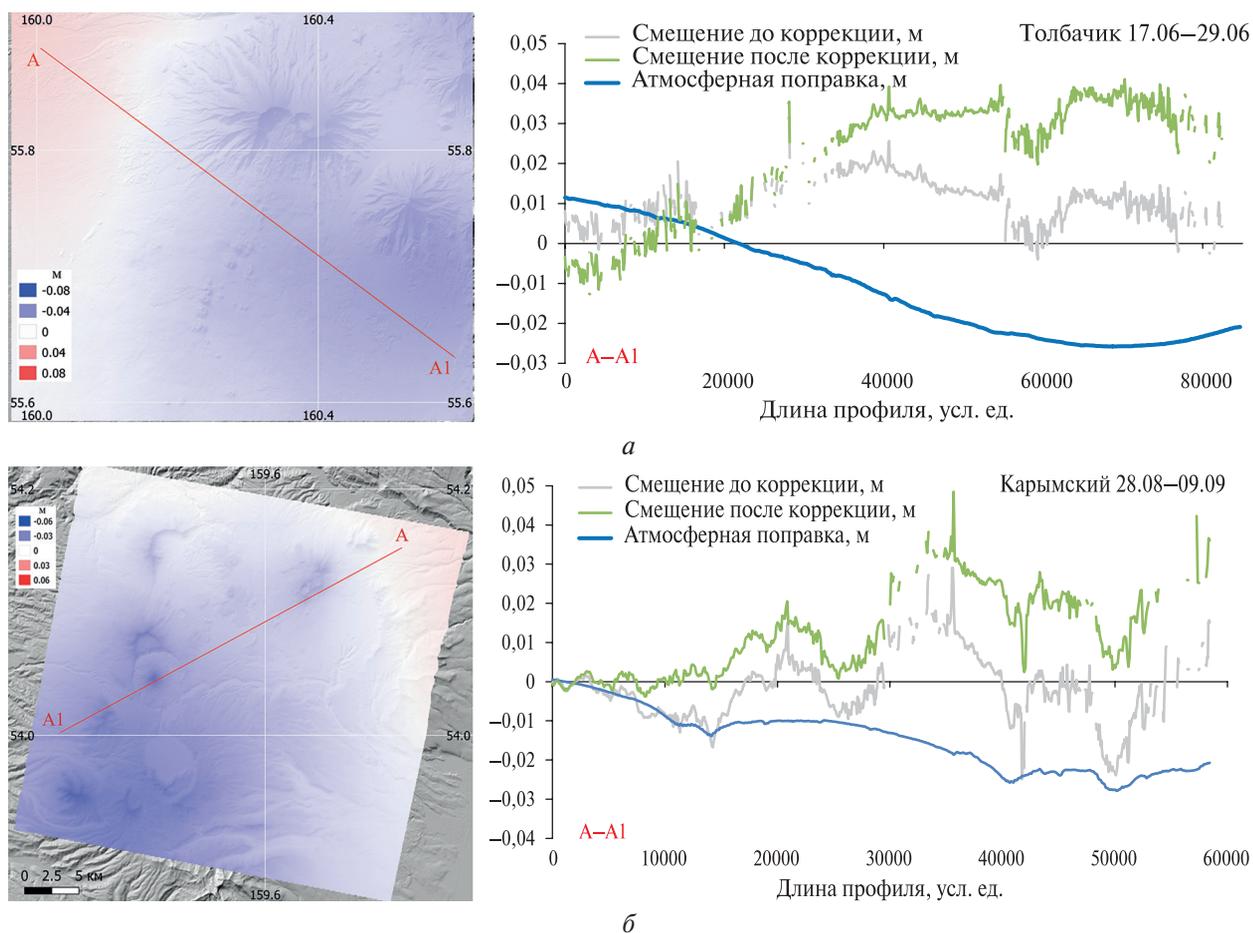


Рис. 6. Карты атмосферных поправок GACOS (слева); смещения и атмосферная поправка вдоль профиля, обозначенного красной линией (справа): а — влк. Толбачик (данные по снимкам 17–29.06.2022, $\delta_{Var} = -143\%$); б — влк. Карымский (данные по снимкам 28.08.2022 и 09.09.2022, $\delta_{Var} = -81\%$)

Выводы

Согласно статистическим оценкам, положительный эффект (т. е. снижение дисперсии и корреляции «фаза—топография» ниже 0,3) от введения атмосферной поправки, основанной на погодной модели HRES (GACOS), получен в 63,3 % случаев. Однако, несмотря на то что в этих случаях атмосферная поправка достаточно эффективно учитывала компоненту, зависящую от рельефа местности, на некоторых интерферограммах не полностью устранены компоненты, связанные со стратификацией, и на всех интерферограммах сохраняются компоненты, связанные с турбулентностью атмосферы, возможно содержащие деформационную составляющую.

В некоторых случаях вычитание атмосферной поправки вносит в поле смещений пространственный тренд. Поэтому после коррекции поля смещений необходимо вычесть пространственный тренд и/или добавить константу к результирующему полю смещений. В отдельных случаях учёт атмосферной поправки приводит к существенному увеличению помехи в поле смещений. Вероятнее всего, причины этого кроются в погодной модели HRES, которая интерполируется в пространстве и времени на более детальную сетку, для того чтобы соответствовать спутниковому снимку, выполненному в конкретное время.

В целом в данной работе, с учётом особенности экстремальных условий Камчатского региона (погода, рельеф, невысокая когерентность вулканических склонов, низкое отношение сигнал/шум в интерферограммах), для скорректированных результатов полей смещений максимальная стандартная ошибка уменьшилась с 0,022 до 0,011 м. Поэтому, несмотря на возникающие проблемы, мы считаем целесообразным использовать онлайн-сервис атмосферных поправок GACOS. При этом рекомендуется рассчитывать приведённые в работе статистические критерии и при статистически положительном эффекте, несмотря на остаточные шумы, применять атмосферную коррекцию с помощью погодной модели HRES (GACOS) для полей смещений, полученных на территорию Камчатки.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-17-00064 (<https://rscf.ru/project/23-17-00064>).

Литература

1. Ингель Л. Х., Макоско А. А. О влиянии неоднородностей силы тяжести на теплообмен атмосферы с подстилающей поверхностью // Геофиз. исслед. 2022. Т. 23. № 3. С. 5–13. <https://doi.org/10.21455/gr2022.3-1>.
2. Baran I., Stewart M. P., Kampes B. M. et al. A modification to the Goldstein radar interferogram filter // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2003. V. 41. No. 9. P. 2114–2118. DOI: 10.1109/TGRS.2003.817212.
3. Beauducel F., Briole P., Froger J. L. Volcano-wide fringes in ERS synthetic aperture radar interferograms of Etna (1992–1998): Deformation or tropospheric effect? // J. Geophysical Research: Solid Earth. 2000. V. 105. Iss. B7. P. 16391–16402. DOI: 10.1029/2000jb900095.
4. Bekaert D. P. S., Hooper A., Wright T. J. A spatially variable power law tropospheric correction technique for InSAR data // J. Geophysical Research: Solid Earth. 2015. V. 120. P. 1345–1356. <https://doi.org/10.1002/2014JB011558>.
5. Biggs J., Dogru F., Dagliyar A. et al. Baseline monitoring of volcanic regions with little recent activity: application of Sentinel-1 InSAR to Turkish volcanoes // J. Applied Volcanology. 2021. V. 10. DOI: 10.1186/s13617-021-00102-x.
6. Chaabane F., Avallone A., Tupin F. et al. A multitemporal method for correction of tropospheric effects in differential SAR interferometry: Application to the gulf of Corinth earthquake // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2007. V. 45. No. 6. P. 1605–1615. DOI: 10.1109/tgrs.2007. 894026.
7. Darvishi M., Cuzzo G., Bruzzone L., Nilfouroushan F. Performance evaluation of phase and weather-based models in atmospheric correction with Sentinel-1 data: Corvara Landslide in the Alps // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2020. V. 13. P. 1332–1346. <https://doi.org/10.1109/jstars.20>.

8. *Deledalle C. A., Tupin F., Denis L.* A non-local approach for SAR and interferometric SAR denoising // *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.* 2010. P. 714–717. DOI: 10.1109/igarss.2010.5654217.
9. *Deledalle C. A., Denis L., Tupin F.* NL-InSAR: Nonlocal interferogram estimation // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing.* 2011. V. 49. No. 4. P. 1441–1452. DOI: 10.1109/tgrs.2010.2076376.
10. *Doin M. P., Lasserre C., Peltzer G. et al.* Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models // *J. Applied Geophysics.* 2009. V. 69. No. 1. P. 35–50. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2009.03.010.
11. *Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Permanent scatterers in SAR interferometry // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing.* 2001. V. 9. No. 1. P. 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>.
12. *Goldstein R. M., Werner C. L.* Radar interferogram filtering for geophysical applications // *Geophysical Research Letters.* 1998. V. 25. P. 4035–4038. DOI: 10.1029/1998gl900033.
13. *Hanssen R. F.* *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis.* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 308 p. <https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9>.
14. *Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B.* A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers // *Geophysical Research Letters.* 2004. V. 31. No. 23. DOI: 10.1029/2004gl021737.
15. *Li Z., Fielding E. J., Cross P., Preusker R.* Advanced InSAR atmospheric correction: MERIS/MODIS combination and stacked water vapour models // *Intern. J. Remote Sensing.* 2009. V. 30. No. 13. P. 3343–3363. DOI: 10.1080/01431160802562172.
16. *Parker A. L., Biggs J., Walters R. J. et al.* Systematic assessment of atmospheric uncertainties for InSAR data at volcanic arcs using large-scale atmospheric models: application to the Cascade volcanoes, United States // *Remote Sensing of Environment.* 2015. V. 170. P. 102–114. DOI: 10.1016/j.rse.2015.09.003.
17. *Stephens K. J., Wauthier C., Bussard R. C. et al.* Assessment of Mitigation Strategies for Tropospheric Phase Contributions to InSAR Time-Series Datasets over Two Nicaraguan Volcanoes // *Remote Sensing.* 2020. V. 12. No. 5. Article 782. DOI: 10.3390/rs12050782.
18. *Wang Y., Chang L., Feng W. et al.* Topography-correlated atmospheric signal mitigation for InSAR applications in the Tibetan plateau based on global atmospheric models // *Intern. J. Remote Sensing.* 2021. V. 42. No. 11. P. 4361–4379. DOI: 10.1080/01431161.2021.1892856.
19. *Yu C., Penna N. T., Li Z.* (2017a) Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations // *J. Geophysical Research: Atmospheres.* 2017. V. 122. P. 2008–2025. DOI: 10.1002/2016jd025753.
20. *Yu C., Li Z., Penna N. T.* (2017b) Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model // *Remote Sensing of Environment.* 2017. V. 204. P. 109–121. DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.038.
21. *Yu C., Li Z., Penna N. T., Crippa P.* Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations // *J. Geophysical Research: Solid Earth.* 2018. V. 123. P. 9202–9222. <https://doi.org/10.1029/2017JB015305>.

Analysing the efficiency of the HRES (GACOS) global weather model for correction of atmospheric noise in interferometric estimates of displacement fields on the example of volcanoes in Kamchatka

M. S. Volkova, V. O. Mikhailov, R. S. Osmanov

*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow 123242, Russia
E-mail: msvolkova6177@gmail.com*

We investigate the actual problem of elimination of atmospheric phase delays in the calculation of displacement fields by differential interferometry (Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar — DInSAR) using satellite radar images of Kamchatka peninsula. The atmospheric correction model GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service), based on the HRES (High Resolution) weather model, was tested to correct displacement fields obtained from Sentinel-1A satellite images of the volcanic regions of northern, central and southern Kamchatka (Tolbachik, Mutnovsky-Gorely volcanoes, Karymsky volcanic center, Avachinsky-Koryak group of volcanoes). According to statistical estimates of the effectiveness of the introduced atmospheric corrections, a positive result was observed

for 63.3 % of interferograms. The tropospheric component is not completely removed, but to a significant extent, while the turbulent component remains unchanged in the corrected results along with the deformation component. In some cases, subtracting the atmospheric correction added additional noise to the displacement field. We used statistical criteria to assess the effectiveness of the applied corrections. For the corrected displacement field results, the maximum standard error reduced from 0.022 to 0.011 m. In general, taking into account the extreme conditions of the Kamchatka region for satellite radar interferometry (weather, topography, low coherence of natural landscapes, low signal-to-noise ratio in interferograms), with a positive statistical effect from the introduced correction, the weather model HRES (GACOS) is recommended to be applied when using differential interferometry methods for this territory.

Keywords: satellite interferometry, SAR, Sentinel-1A, weather model, HRES, GACOS, atmospheric noise, phase delay, volcanoes, Kamchatka

Accepted: 27.02.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-9-22

References

1. Ingel L. Kh., Makosko A. A., On the influence of gravity field inhomogeneities on heat exchange of the atmosphere with the underlying surface, *Geophysical Research*, 2022, Vol. 23, No. 3, pp. 5–13 (in Russian), <https://doi.org/10.21455/gr2022.3-1>.
2. Baran I., Stewart M. P., Kampes B. M. et al., A modification to the Goldstein radar interferogram filter, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2003, Vol. 41, No. 9, pp. 2114–2118, DOI: 10.1109/TGRS.2003.817212.
3. Beauducel F., Briole P., Froger J. L., Volcano-wide fringes in ERS synthetic aperture radar interferograms of Etna (1992–1998): Deformation or tropospheric effect? *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, Vol. 105, Issue B7, pp. 16391–16402, DOI: 10.1029/2000jb900095.
4. Bekaert D. P. S., Hooper A., Wright T. J., A spatially variable power law tropospheric correction technique for InSAR data, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, Vol. 120, pp. 1345–1356, <https://doi.org/10.1002/2014JB011558>.
5. Biggs J., Dogru F., Dagliyar A. et al., Baseline monitoring of volcanic regions with little recent activity: application of Sentinel-1 InSAR to Turkish volcanoes, *J. Applied Volcanology*, 2021, Vol. 10, DOI: 10.1186/s13617-021-00102-x.
6. Chaabane F., Avallone A., Tupin F. et al., A Multitemporal Method for Correction of Tropospheric Effects in Differential SAR Interferometry: Application to the Gulf of Corinth Earthquake, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2007, Vol. 45, Issue 6, pp. 1605–1615, DOI: 10.1109/tgrs.2007.894026.
7. Darvishi M., Cuzzo G., Bruzzone L., Nilfouroushan F., Performance Evaluation of Phase and Weather-Based Models in Atmospheric Correction With Sentinel-1 Data: Corvara Landslide in the Alps, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, Vol. 13, pp. 1332–1346, <https://doi.org/10.1109/jstars.20>.
8. Deledalle C. A., Tupin F., Denis L., A non-local approach for SAR and interferometric SAR denoising. *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2010, pp. 714–717, DOI: 10.1109/igarss.2010.5654217.
9. Deledalle C. A., Denis L., Tupin F., NL-InSAR: Nonlocal interferogram estimation, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2011, Vol. 49, Issue 4, pp. 1441–1452, DOI: 10.1109/tgrs.2010.2076376.
10. Doin M. P., Lasserre C., Peltzer G. et al., Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models, *J. Applied Geophysics*, 2009, Vol. 69, Issue 1, pp. 35–50, DOI: 10.1016/j.jappgeo.2009.03.010.
11. Ferretti A., Prati C., Rocca F., Permanent scatterers in SAR interferometry. In: *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2001, Vol. 39, Issue 1, pp. 8–20, <https://doi.org/10.1109/36.898661>.
12. Goldstein R. M., Werner C. L., Radar interferogram filtering for geophysical applications, *Geophysical Research Letters*, 1998, Vol. 25, pp. 4035–4038, DOI: 10.1029/1998gl1900033.
13. Hanssen R. F., *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001, 308 p., <https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9>.
14. Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B., A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *Geophysical Research Letters*, 2004, Vol. 31, Issue 23, DOI: 10.1029/2004gl021737.
15. Li Z., Fielding E. J., Cross P., Preusker R., Advanced InSAR atmospheric correction: MERIS/MODIS combination and stacked water vapour models, *Intern. J. Remote Sensing*, 2009, Vol. 30, Issue 13, pp. 3343–3363, DOI: 10.1080/01431160802562172.

16. Parker A. L., Biggs J., Walters R. J. et al., Systematic assessment of atmospheric uncertainties for InSAR data at volcanic arcs using large-scale atmospheric models: application to the Cascade volcanoes, United States, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 170, pp. 102–114, DOI: 10.1016/j.rse.2015.09.003.
17. Stephens K. J., Wauthier C., Bussard R. C. et al., Assessment of Mitigation Strategies for Tropospheric Phase Contributions to InSAR Time-Series Datasets over Two Nicaraguan Volcanoes, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 5, Article 782, DOI: 10.3390/rs12050782.
18. Wang Y., Chang L., Feng W. et al., Topography-correlated atmospheric signal mitigation for InSAR applications in the Tibetan plateau based on global atmospheric models, *Intern. J. Remote Sensing*, 2021, Vol. 42, No. 11, pp. 4361–4379, DOI: 10.1080/01431161.2021.1892856.
19. Yu C., Penna N. T., Li Z. (2017a), Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, Vol. 122, pp. 2008–2025, DOI: 10.1002/2016jd025753.
20. Yu C., Li Z., Penna N. T. (2017b), Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 204, pp. 109–121, DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.038.
21. Yu C., Li Z., Penna N. T., Crippa P., Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, Vol. 123, pp. 9202–9222, <https://doi.org/10.1029/2017JB015305>.