

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРНЫХ ПОПРАВКОВ К ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ КАМЧАТКИ

© 2025 г. М. С. Волкова¹ *, В. О. Михайлов¹, Р. С. Османов¹

¹ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

*E-mail: msvolkova6177@gmail.com

Поступила в редакцию 12.02.2025 г.

В работе проведен сравнительный анализ результатов применения атмосферных поправок к конкретным полям смещений, рассчитанным методом дифференциальной интерферометрии на вулканический район Камчатки в активную фазу извержений, сопровождавшихся существенными изменениями состава атмосферы. Атмосферные поправки вычислялись двумя способами: 1) по данным фазовых задержек онлайн сервиса GACOS (Generic Atmospheric Corrections Online Service), 2) по задержкам, рассчитанным с использованием эмпирической погодной модели, построенной по данным локальных метеостанций и станций ГНСС Камчатки. Проведен анализ эффективности каждой модели поправок и выполнена оценка их влияния на поля смещений. Положительный результат, удовлетворяющий условиям уменьшения шума и снижения тропосферного эффекта получен для 74% интерферограмм с поправкой GACOS, а по эмпирической погодной модели для 48% интерферограмм. В отдельных случаях поправки эмпирической модели оказались точнее, чем поправки GACOS. Анализ влияния атмосферных поправок на поле смещений показал, что в некоторых случаях модель GACOS вносит изменения в поле смещений, формируя области положительных или отрицательных аномалий, не имеющих связи с исходным полем смещений. Модель атмосферных поправок, рассчитанная по данным местных локальных метеостанций, которые не входят в международный синоптический список, полезна для дополнения и развития методов устранения атмосферной компоненты интерферометрической фазы. Выполненное исследование показало, что в Камчатском регионе модели GACOS во многих случаях позволяют эффективно устранять атмосферные помехи и повышать точность оценки полей смещений. С другой стороны, в ряде случаев поправки могут вносить дополнительные помехи, поэтому мы не рекомендуем использовать поправки по умолчанию, без сопоставления исходного и скорректированного полей смещений, с особым вниманием проводить анализ смещений, которые появились после введения поправок.

Ключевые слова: спутниковая интерферометрия, радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), Камчатка, атмосферные поправки, геостатистика, вариограмма

DOI: 10.7868/S3034540525030027

ВВЕДЕНИЕ

В спутниковой интерферометрии большое внимание уделяется исследованию проблемы влияния атмосферных помех на радиолокационные изображения при расчете полей смещений, поскольку атмосферные эффекты могут вносить существенные искажения в фазовый сигнал, что сказывается на оценке фактической деформационной компоненты. Атмосферные помехи обусловлены, в частности, задержками фазового сигнала при прохождении через слои тропосферы. В основном такие задержки рассчитываются на основе данных численных погодных моделей. В работе (Волкова и др., 2025) мы оценили точность фазовых задержек, полученных двумя разными способами: 1) с помощью онлайн сервиса GACOS и 2) с помощью локальной эмпи-

рической погодной модели, для которой заданы физические свойства атмосферы, измеренные по данным местных метеостанций Камчатки. Для оценки точности использовались данные измерений шести станций ГНСС, расположенных в районе Ключевской группы вулканов (КГВ). Предполагается, что измерения в пунктах ГНСС имеют минимальную погрешность, поэтому задержки, рассчитанные по этим данным, приняты за истинные.

В работе (Волкова и др., 2025) показано, что модель GACOS имеет меньшую погрешность и лучше совпадает с данными, рассчитанными по ГНСС в точках сопоставления результатов. Но при этом для 25% результатов задержки по эмпирической модели превосходят по точности задержки модели GACOS. Следовательно, в точках сравнения данных (на шести пунктах ГНСС), фазовые задержки,

рассчитанные по локальной эмпирической модели, также позволяют рассчитать атмосферные поправки с высокой точностью. Однако оценка точности задержек в отдельных пунктах не дает представления о том, как повлияют атмосферные поправки на все поле смещений.

В данной работе на основе методики, разработанной в (Волкова и др., 2025), мы рассчитали карты зенитных задержек по эмпирической модели, получили аналогичные карты с сервиса GACOS и вычислили по ним атмосферные поправки для конкретных полей смещений земной поверхности, рассчитанных с помощью радиолокационной интерферометрии по 24 снимкам спутника Sentinel-1A. Затем мы сравнили результаты коррекции полей смещений, полученных по двум моделям (GACOS и эмпирической погодной модели) и оценили эффективность каждой из них.

При анализе эффективности применения атмосферных коррекций и их влияния на поля смещений критериями улучшения качества результата были повышение точности расчета значений смещений, уменьшение шума, устранение тропосферного эффекта, который выражается в зависимости значений смещений от топографии, выявление и устранение пространственного тренда, наличие которого не всегда можно определить визуально, особенно на горном рельефе и при небольшой площади когерентных областей.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Район исследования. Область исследования, для которой были собраны и обработаны спутниковые снимки, была выбрана так, чтобы она включала область, для которой построена эмпирическая модель атмосферы по метеостанциям Камчатки. На рис. 1а показаны: положение метеостанций и область построения эмпирической модели, станции ГНСС, территория, покрываемая снимками спутника Sentinel-1A, район исследования — область расчета смещений. На рис. 1б показан увеличенный фрагмент карты на район исследования, треугольниками обозначены основные вулканы, входящие в Ключевскую группу. Важно, что здесь мы рассматриваем 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.

Данные о смещениях земной поверхности, рассчитанные методом спутниковой радиолокационной интерферометрии. В связи с погодными особенностями Камчатского региона, применение спутниковой интерферометрии для расчета смещений земной поверхности ограничено интервалом времени, охватывающим бесснежный период, в основном, с мая по октябрь. В остальные месяцы наблюдается сильная декорреляция снимков из-за наличия

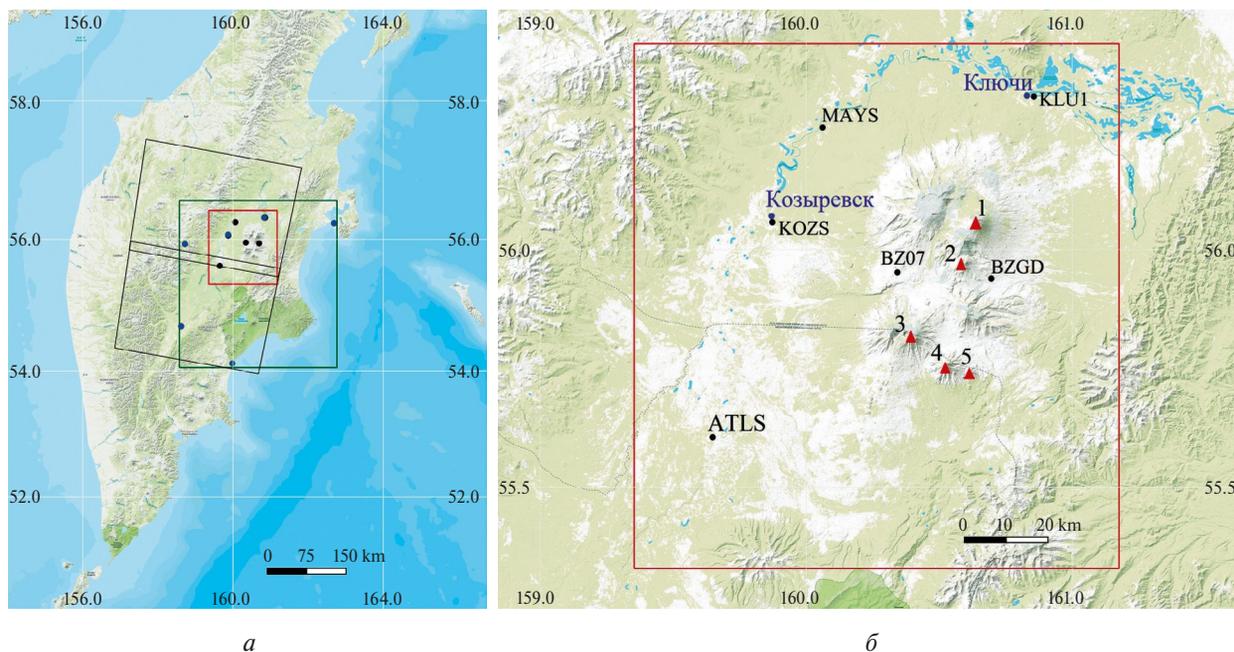


Рис. 1. а — Обзорная карта, п-ов Камчатка. Красный контур — область исследования. Черный контур — области покрытия территории снимками Sentinel-1A, включающих район исследования. Зеленый контур — область построения эмпирической модели атмосферы по данным метеостанций (синие точки). Черные точки — станции ГНСС. б — Район исследования (красный контур) крупным планом с обозначением вулканов: 1 — Ключевской, 2 — Безымянный, 3 — Плоский Толбачик, 4 — Большая Удина, 5 — Малая Удина.

мощного снежного покрова. В результате, с учетом когерентности снимков и их качества, для расчета интерферограмм и полей смещений на территорию северной части Камчатки, включающей Ключевскую группу вулканов, были отобраны 24 снимка спутника Sentinel-1A с нисходящей орбиты 60D, выполненных в интервалы времени 29.05–28.07.2021, 24.05–21.09.2022, 19.05–28.09.2023 гг. Все интерферограммы были рассчитаны в программном комплексе SARscape методом DInSAR как последовательные пары с минимальным временным интервалом, развернуты со средней фазой равной нулю и пересчитаны из радиан в метры. В результате получены смещения U_{los} , измеренные вдоль линии распространения электромагнитного сигнала (англ. *line of sight*, LOS). Для устранения влияния топографической компоненты, использовалась цифровая модель рельефа AW3D30 (ALOS World 3D – 30m). В таблице 1 приведен список пар снимков с указанием даты съемки.

Атмосферные поправки, рассчитанные по данным онлайн сервиса GACOS. Для расчета атмосферных поправок по данным онлайн-сервиса GACOS (Yu et al., 2017, 2018) получены 24 карты зенитных фазовых задержек ΔL_{gacos} (м), покрывающих территорию исследования и соответствующие датам выполнения радиолокационной съемки (табл. 1). Атмосферные поправки с учетом направления распространения электромагнитного сигнала от спутника до земной поверхности при этом будут равны $A_{gacos} = (\Delta L_{gacos_{t1}} - \Delta L_{gacos_{t2}}) / \cos(\theta)$, где $t1$ и $t2$ начальная и конечная даты выполнения съемки, θ – угол отклонения зондирующего луча от вертикали. Поскольку смещения по интерферометрической паре мы считаем от более ранней даты на более позднюю дату (“разность вперед”), то при вычислении атмосферных поправок также необходимо получить

разность задержек от ранней даты до более поздней. Тогда для коррекции исходного поля смещений атмосферную поправку, полученную по данным GACOS необходимо ввести со знаком минус:

$$U_{corr}^{gac} = U_{los} - A_{gacos}. \quad (1)$$

Атмосферные поправки, рассчитанные по данным метеостанций Камчатки. В работе (Волкова и др., 2025) изложена методика расчета фазовых задержек электромагнитной волны в слоях тропосферы по данным эмпирической погодной модели с использованием измерений температуры, давления и влажности атмосферы на метеостанциях Камчатки. Для этого использованы эмпирические зависимости давления, температуры и парциального давления водяного пара от высоты. На даты съемки i спутниковых снимков Sentinel-1A (табл. 1) были вычислены зенитные задержки ΔL_{meteo} . Тогда атмосферные поправки с пересчетом в LOS будут равны $A_{meteo} = (\Delta L_{meteo_{t1}} - \Delta L_{meteo_{t2}}) / \cos(\theta)$. Для коррекции исходного поля смещений атмосферную поправку, рассчитанную по данным эмпирической модели необходимо вычесть:

$$U_{corr}^{met} = U_{los} - A_{meteo}. \quad (2)$$

Методы оценки эффективности атмосферных поправок в поле смещений. После введения атмосферной поправки в поле смещений эффект оценивался по относительному изменению дисперсии $\delta_{var} = (Var(U_{los}) - Var(U_{corr}^{model})) / Var(U_{los}) \times 100\%$ (где U_{corr}^{model} – поле смещений, скорректированное атмосферными поправками, рассчитанными соответственно по модели GACOS или по эмпирической погодной модели), а также по корреляционной связи значений поля смещений с топографией. Критерием снижения уровня помех и уменьшения шума считается положительное изменение относительной дисперсии ($\delta_{var} > 0$).

В вулканических районах поля деформаций, связанные с перемещением магмы на глубине, могут иметь значительные пространственные размеры, но величина смещений будет небольшой. Эти деформационные сигналы почти никогда не регистрируются по спутниковым снимкам и не увеличивают разброс значений поля смещений относительно среднего. Перемещения магмы на небольшой глубине и ее внедрение в вулканическую постройку создает локальные деформации, величина которых уверенно регистрируется по спутниковым радиолокационным снимкам (Волкова и др. 2024а; Михайлов и др., 2021). Эти локальные деформации также обычно не вносят существенного вклада в дисперсию деформационного поля при расчетах на больших площадях. Таким образом, дисперсия поля смещений для больших, в том числе вулканических, территорий, в основном характеризует уровень шума, атмосферных помех, в том

Таблица 1. Даты съемки снимков, составивших интерферометрические пары. Съемка территории Камчатки спутником Sentinel-1A с орбиты 60 происходит примерно в 19:40 по времени UTC

1	29.05–10.06.2021	13	28.08–09.09.2022
2	10.06–22.06.2021	14	09.09–21.09.2022
3	22.06–04.07.2021	15	19.05–12.06.2023
4	04.07–16.07.2021	16	12.06–24.06.2023
5	16.07–28.07.2021	17	24.06–06.07.2023
6	24.05–05.06.2022	18	06.07–18.07.2023
7	05.06–17.06.2022	19	18.07–11.08.2023
8	17.06–29.06.2022	20	11.08–23.08.2023
9	29.06–11.07.2022	21	23.08–04.09.2023
10	11.07–04.08.2022	22	04.09–16.09.2023
11	04.08–16.08.2022	23	16.09–28.09.2023
12	16.08–28.08.2022		

числе, длиннопериодные трендовые компоненты. Поэтому мы используем дисперсию, как меру помеховой составляющей.

Критерием отсутствия зависимости значений поля смещений от топографии считается корреляция, коэффициент которой не превышает значения 0.3 ($C \leq 0.3$). По сравнению с работой (Волкова и др., 2024б) был введен порог оценки корреляционной связи по топографии, который подбирался эмпирически. Для расчета корреляции учитывались только те значения поля смещений, которые получены в областях с топографическими отметками выше 200 м. Тем самым мы исключили всю область долины реки Камчатка, которая при низких топографических отметках на развернутых интерферограммах содержит большое количество информации с малым отношением сигнал/шум (рис. 2). Кластер данных низкого качества, содержащий значительное число точек, создает так называемую наведенную корреляцию и приводит к ложной оценке истинного коэффициента кор-

реляции значений поля смещений и топографии. Статистическая точность результирующего поля смещений оценивалась с помощью стандартного отклонения. Поскольку атмосферные помехи могут вносить изменения в пространственную структуру данных в зависимости от направления, мы исследовали анизотропию вариограмм для выявления пространственных трендов, а также для оценки качества устранения трендов при их наличии. Для этого мы строили вариограммы по четырем азимутальным направлениям для углов $\alpha = -45, 0, 45, 90^\circ$ (угол измеряется в направлении запад-восток против часовой стрелки). В классической двухточечной геостатистике вариограмма определяется как (например, Chiles, Delfiner, 1999; Демьянов, Савельева, 2010; Ковалевский, 2011):

$$\gamma(h) = 1/(2N(h)) \sum_i [p(x_i) - p(x_i + h)]^2, \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, N(h),$$

где $N(h)$ – количество точек $p(x)$, разделенных вектором h , x_i – координата точки. При анализе

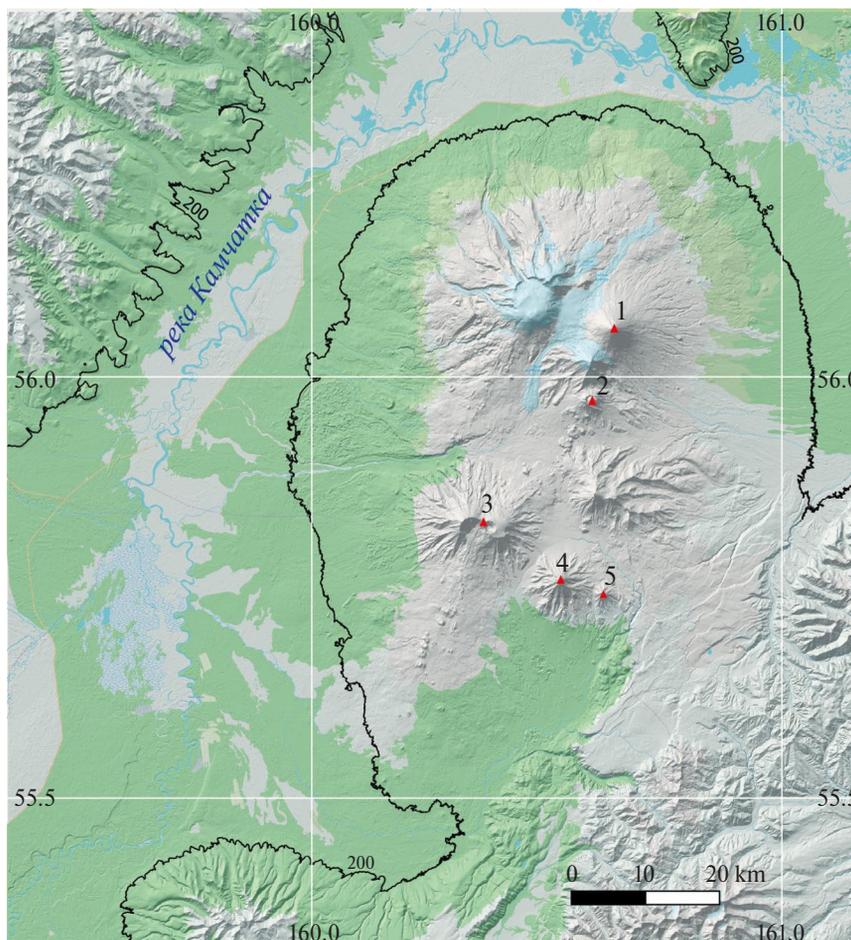


Рис. 2. Карта рельефа местности в области расчета полей смещений по интерферометрии. Черная изолиния проведена по гипсометрической отметке 200 м, выше которой учитываются соответствующие значения смещений для оценки корреляционной зависимости с рельефом. Названия вулканов даны на рис. 1б.

вариограммы мы рассматриваем такие параметры как порог вариограммы – значение, к которому стремится $\gamma(h)$, начиная с некоторого расстояния h . Расстояние h , при котором функция “выходит на плато”, определяет радиус корреляции пространственных данных. Если $\gamma(h)$ неограниченно возрастает, т.е. отсутствует порог, и радиус корреляции данных охватывает всю область исследования, это обычно связано с наличием тренда.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

По двум моделям (GACOS и эмпирической погодной модели) были вычислены два набора карт атмосферных поправок для полей смещений, рассчитанных по 23 интерферограммам на интервалы времени, указанные в табл. 1. Атмосферные поправки GACOS (A_{gacos}) и поправки эмпирической модели (A_{meteo}) были вычтены из полей смещений U_{los} . Затем был выполнен анализ эффективности атмосферных коррекций с применением выбранных статистических критериев. В таблице 2 показаны результаты оценки относительного изменения дисперсии и оценки влияния тропосферного эффекта,

выраженного через коэффициент корреляции поля смещений с топографией (C). После вычитания из поля смещений поправок GACOS, положительный результат, одновременно удовлетворяющий относительному уменьшению дисперсии ($\delta_{var} > 0$) и снижению тропосферного эффекта ($C \leq 0.3$), получен для 17 интерферограмм из 23 (74%), а для эмпирической погодной модели такой эффект получен для 11 интерферограмм (48% от общего количества). Номера этих интерферограмм показаны в зеленом контуре на рис. 3а и 3б соответственно.

Анализ вариограмм показал, что атмосферные поправки A_{gacos} намного эффективнее устраняют пространственный тренд, в сравнении с поправками A_{meteo} . На рис. 4 приведен пример коррекции интерферограммы 16.07–28.07.2021 (строка 5 в табл. 2). На рис. 4а показано исходное поле смещений U_{los} . На рис. 4б и 4в – атмосферные поправки A_{gacos} и A_{meteo} соответственно. Результаты вычитания атмосферных поправок из исходного поля смещений показаны на рис. 4г (U_{corr}^{gac}) и 4д (U_{corr}^{met}). По полю смещений на горном рельефе и на несвязанных в пространстве когерентных областях визуально бывает трудно оценить наличие и направ-

Таблица 2. Статистические критерии оценки эффективности применения атмосферных поправок

№	Интерферограмма	$C(U_{los})$	$C(U_{corr}^{gac})$	$C(U_{corr}^{met})$	$\delta_{var}(U_{corr}^{gac}) \%$	$\delta_{var}(U_{corr}^{met}) \%$
1	29.05–10.06.2021	-0.11	-0.0552	-0.42	52.47	-56.1
2	10.06–22.06.2021	0.22	0.22	0.06	52.38	-69.5
3	22.06–04.07.2021	-0.21	-0.33	-0.19	68.31	-46.36
4	04.07–16.07.2021	0.6	0.29	0.27	83.65	42.69
5	16.07–28.07.2021	0.28	0.25	0.19	46.75	61.13
6	24.05–05.06.2022	0.32	-0.0013	0.27	-8.55	44.44
7	05.06–17.06.2022	0.13	0.1	-0.2	65.70	42.38
8	17.06–29.06.2022	0.34	0.54	0.28	-60.05	-35.53
9	29.06–11.07.2022	0.24	-0.52	-0.53	-7.34	10.60
10	11.07–04.08.2022	-0.23	-0.23	0.32	21.27	5.18
11	04.08–16.08.2022	-0.16	0.21	0.25	-56.18	-44.85
12	16.08–28.08.2022	0.38	-0.11	0.15	72.31	38.59
13	28.08–09.09.2022	-0.45	-0.026	-0.33	82.54	34.83
14	09.09–21.09.2022	-0.12	0.0959	0.31	10.76	-33.48
15	19.05–12.06.2023	0.24	0.42	0.03	16.68	31.42
16	12.06–24.06.2023	0.46	0.18	0.15	45.49	21.18
17	24.06–06.07.2023	0.49	-0.19	0.29	69.12	38.32
18	06.07–18.07.2023	0.02	0.19	0.16	71.41	26.88
19	18.07–11.08.2023	-0.57	-0.02	-0.35	60.36	-26.92
20	11.08–23.08.2023	0.44	-0.21	-0.28	52.09	-170.61
21	23.08–04.09.2023	-0.63	0.01	0.17	34.81	-35.88
22	04.09–16.09.2023	0.03	-0.13	-0.09	24.87	10.79
23	16.09–28.09.2023	-0.398	-0.04	-0.13	7.48	40.20

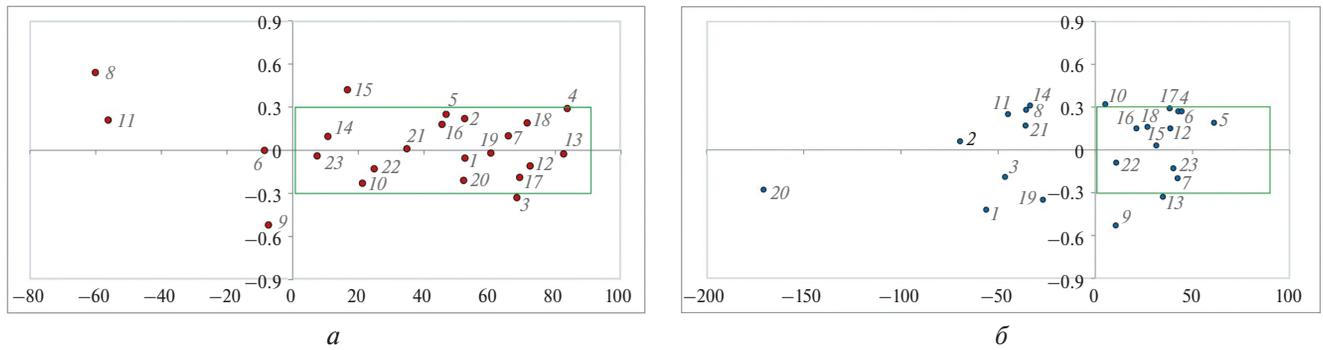


Рис. 3. Значения статистических оценок критериев эффективности применения атмосферных поправок. Горизонтальная ось – относительное изменение дисперсии (δ_{var}) в %, вертикальная ось – коэффициент корреляции смещений U_{los} с топографией. *a* – Результат применения поправки A_{gac} , *b* – результат применения поправки A_{meteo} . Числами обозначены номера интерферограмм из таблицы 1. Зеленый прямоугольник – область выполнения критериев улучшения результата после коррекции атмосферных помех.

ление тренда. Вариограммы в правой части рис. 4, построенные по четырем направлениям, дают наглядное представление о пространственной структуре данных и выявляют их анизотропию. Видно, что исходное поле смещений (рис. 4*a*) содержит тренд в направлениях ЮЗ–СВ, З–В, а так-

же Ю–С (синяя, зеленая и фиолетовая кривые на верхнем рисунке справа неограниченно возрастают), но при этом в направлении СЗ–ЮВ тренд отсутствует (красная кривая ограничена пределом, который равен примерно 6 мм). То же самое выявляется для поля смещений, скорректированного

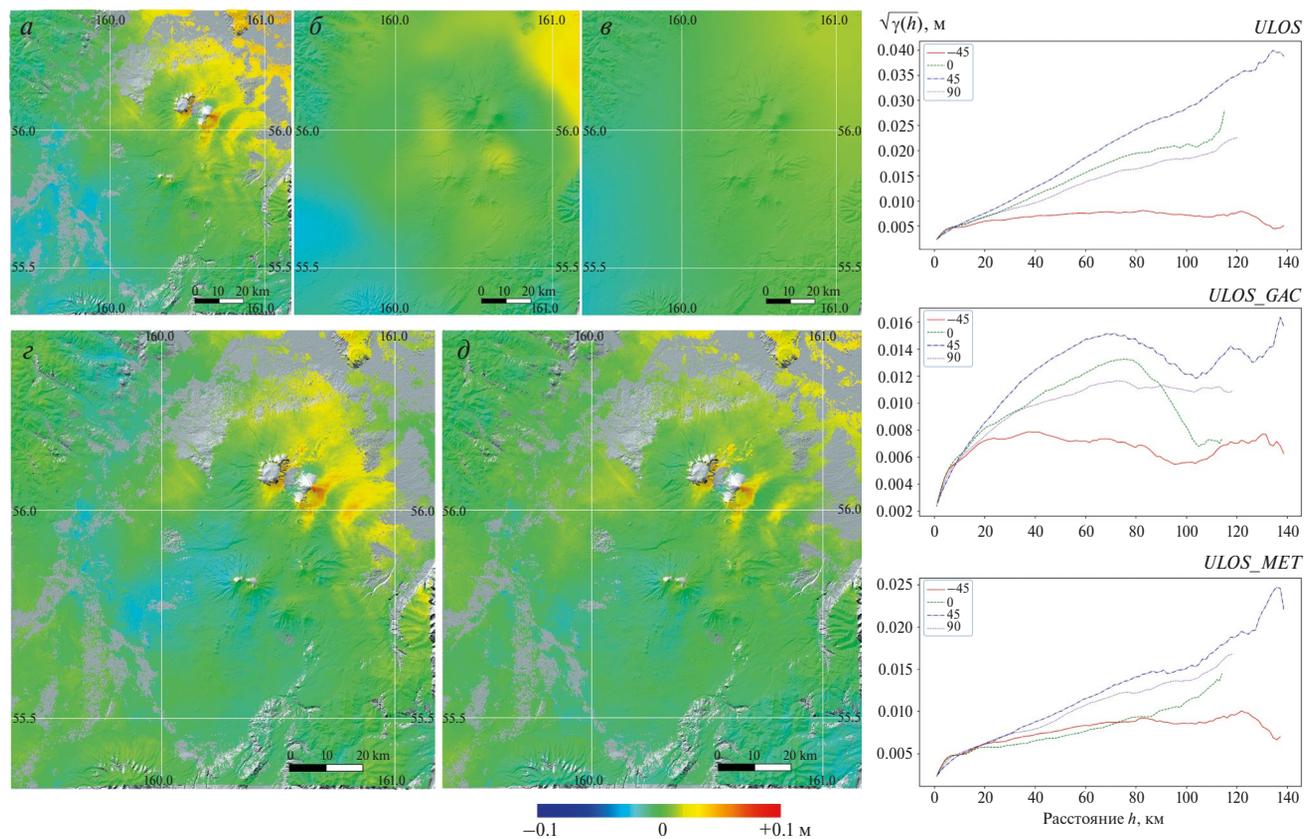


Рис. 4. *a* – Исходное поле смещений U_{los} по снимкам 16.07–28.07.2021 ($C = 0.28$). *b* и *в* – Атмосферные поправки A_{gac} и A_{meteo} соответственно. *г* – Скорректированное поле смещений U_{corr}^{gac} ($C = 0.25$, $\delta_{var} = 46.75\%$). *д* – Скорректированное поле смещений U_{corr}^{met} ($C = 0.19$, $\delta_{var} = 61.13\%$). Справа вариограммы для карт *a*, *г* и *д* соответственно.

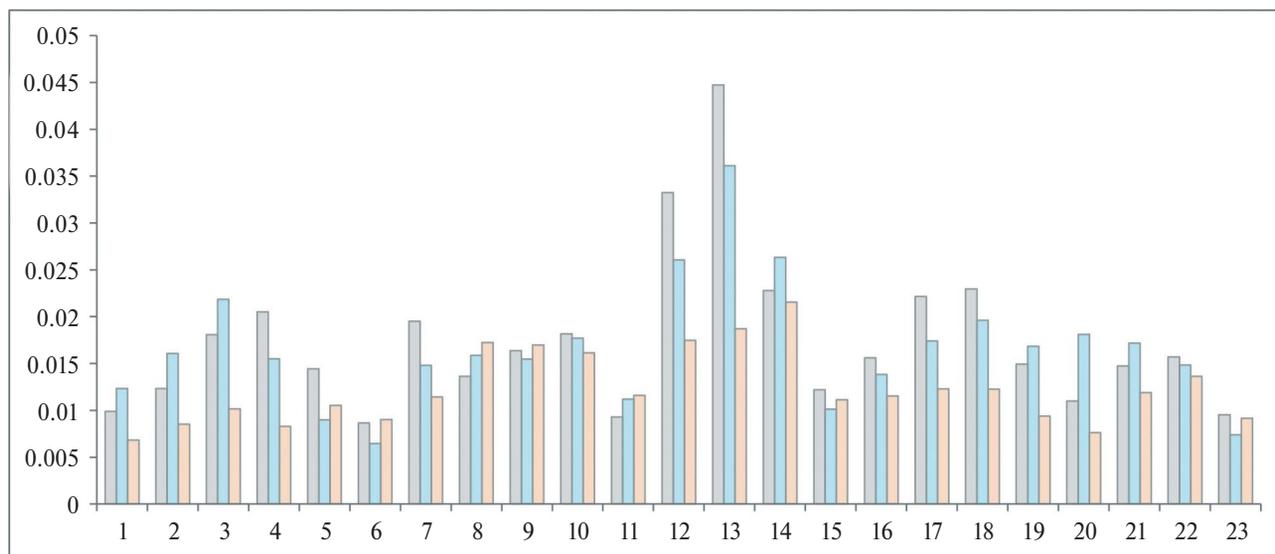


Рис. 5. Среднеквадратические отклонения в метрах (вертикальная ось) — оценка точности результатов рассчитанных полей смещений: серый цвет — исходное поле смещений, голубой — смещения с атмосферными поправками A_{meteo} , розовый — смещения с атмосферными поправками A_{gacos} .

атмосферными поправками эмпирической модели A_{meteo} (рис. 4д и соответствующие ему вариограммы на нижнем рисунке справа). Поскольку значение вариограммы $\gamma(h)$ сопоставимо с дисперсией, видно, что шум в поле смещений уменьшился, т.к. значения вариограмм, представленных синей (направление ЮЗ–СВ), зеленой (З–В) и фиолетовой (Ю–С) кривыми, в некоторых случаях снизились в 2 раза. Поле смещений, скорректированное поправками A_{gacos} (рис. 4з), демонстрирует отсутствие трендов по всем четырем направлениям. Все вариограммы, соответствующие этому полю смещений (средний рисунок справа), выходят на плато, при этом радиус корреляции данных для разных направлений равен \sim от 20 до 60 км. Тем не менее, для рассмотренной интерферограммы лучший результат получен после вычитания атмосферной поправки, рассчитанной по эмпирической модели (A_{meteo}), при которой изменение относительной дисперсии (уменьшение помехи) составило 61.13%, в то время как с поправками GACOS этот критерий равен 46.75%.

В целом, анализ анизотропии вариограмм показал, что поправки эмпирической модели почти не учитывают пространственный тренд, наличие которого надо анализировать и устранять отдельно. В интерферограммах, скорректированных поправками GACOS тренд в одном или в нескольких направлениях наблюдается всего в 6 случаях из 23 (см. Приложение)¹.

¹ Дополнительные материалы размещены в электронном виде по DOI статьи: 10.31857/S0205961425030029.

Если сравнивать атмосферные поправки по критериям уменьшения тропосферного эффекта ($C_{corr} \leq 0.3$) или уменьшения общей помеховой составляющей ($\delta_{var} > 0$), то поправки A_{meteo} показали лучший эффект, чем поправки A_{gacos} , для четырех интерферограмм (№№ 5, 6, 15, 23 в табл. 2) при выполнении условия $\delta_{var}(U_{corr}^{met}) > \delta_{var}(U_{corr}^{gac})$. Для пяти интерферограмм (№№ 5, 15, 16, 18, 22) при выполнении условия $C(U_{corr}^{met}) < C(U_{corr}^{gac})$ поправки сопоставимы.

Для количественной оценки точности результатов использовалось среднеквадратическое отклонение (стандартная ошибка) исходных полей смещений и скорректированных смещений по GACOS и по эмпирической модели. На рис. 5 на диаграмме показаны серым цветом исходные данные о смещениях до коррекции атмосферных помех. Стандартная ошибка исходных данных в среднем составила 1.7 см (что, в целом, близко к точности расчета полей смещений методом DInSAR). Синий цвет — стандартные отклонения для полей смещений с атмосферной поправкой A_{meteo} , которые в среднем составили 1.65 см (т.е. в среднем заметного улучшения точности добиться не удалось). Как видно из графика, в 9-ти случаях эта модель увеличивает среднеквадратическую ошибку, что мы ассоциируем с усилением шума. Красным цветом обозначены стандартные отклонения для полей смещений с атмосферной поправкой A_{gacos} , которые показывают, что среднее значение стандартного отклонения уменьшилось до 1.2 см. Причем максимальное отклонение (интерферометрическая пара № 13 28.08–09.09.2022) уменьшилось с 4.5 см до

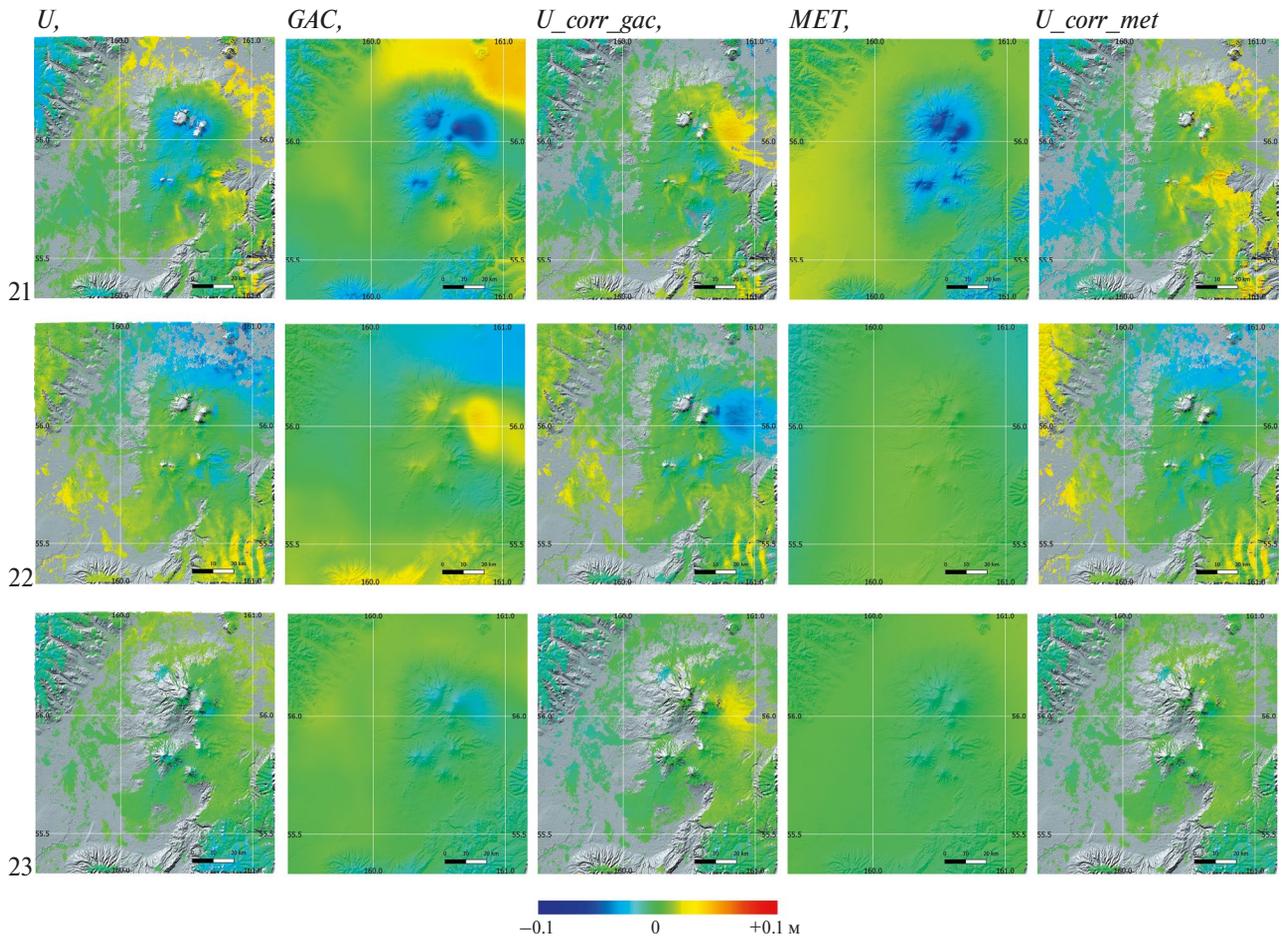


Рис. 6. 1-я колонка – исходные поля смещений U_{los} , рассчитанные по снимкам 23.08–04.09.2023 ($C = -0.63$), 04.09–16.09.2023 ($C = 0.03$), 16.09–28.09.2023 ($C = -0.4$). 2-я колонка – атмосферные поправки A_{gacos} . 3-я колонка – смещения с поправкой A_{gacos} (№ 21 $C = 0.01$, $\delta_{Var} = 34.81\%$; № 22 $C = -0.13$, $\delta_{Var} = 24.87\%$; № 23 $C = -0.04$, $\delta_{Var} = 7.48\%$). 4-я колонка – атмосферные поправки A_{meteo} . 5-я колонка – смещения с поправкой A_{meteo} (№ 21 $C = 0.17$, $\delta_{Var} = -35.88\%$; № 22 $C = -0.09$, $\delta_{Var} = 10.79\%$; № 23 $C = -0.13$, $\delta_{Var} = 40.2\%$).

1.8 см (δ_{Var} для этой интерферограммы равно 83%). Однако в четырех случаях все же получен отрицательный результат (№№ 6, 8, 9, 11). Среднеквадратическая ошибка увеличилась, т.е. в поле смещений появился дополнительный шум. Очевидно, что для интерферограмм, в которых стандартное отклонение увеличилось после вычитания атмосферной поправки, относительное изменение дисперсии δ_{Var} будет отрицательным (см. табл. 2). Большие величины отклонений могут быть обусловлены наличием сильно расчлененного высокогорного рельефа. Напомним, что Ключевской вулкан – самый высокий вулкан Евразии, высота которого равна 4754 м.

При анализе скорректированных полей смещений было обнаружено, что модель GACOS учитывает свойства более сложных процессов, влияющих на состав атмосферы. В статистически положительных результатах, полученных с помощью поправки A_{gacos} , в некоторых случаях в полях смещений

проявляются локальные области, которые трудно связать с деформационной компонентой. Эти артефакты, присутствующие в данных GACOS, перейдут и в поле смещений. На рис. 6 рассмотрены два наиболее сложных, с точки зрения соотношения поправок, примера. В первой колонке показаны поля смещений, рассчитанные для трех последовательных пар снимков: 23.08–04.09.2023, 04.09–16.09.2023, 16.09–28.09.2023 (номера интерферограмм 21, 22, 23). Коэффициенты корреляции величин смещений с топографией равны соответственно -0.63 , 0.03 , -0.4 , т.е. тропосферный эффект выражен для интерферограмм № 21 и № 23. Для интерферограммы № 22 в правом нижнем углу видна сильная помеха, связанная с перемещением атмосферных слоев. Во второй колонке показаны карты атмосферных поправок по модели GACOS, на которых видна аномалия, распространяющаяся на восток от вулкана Ключевской и не имеющая связи с исходными полями смещений. При вычи-

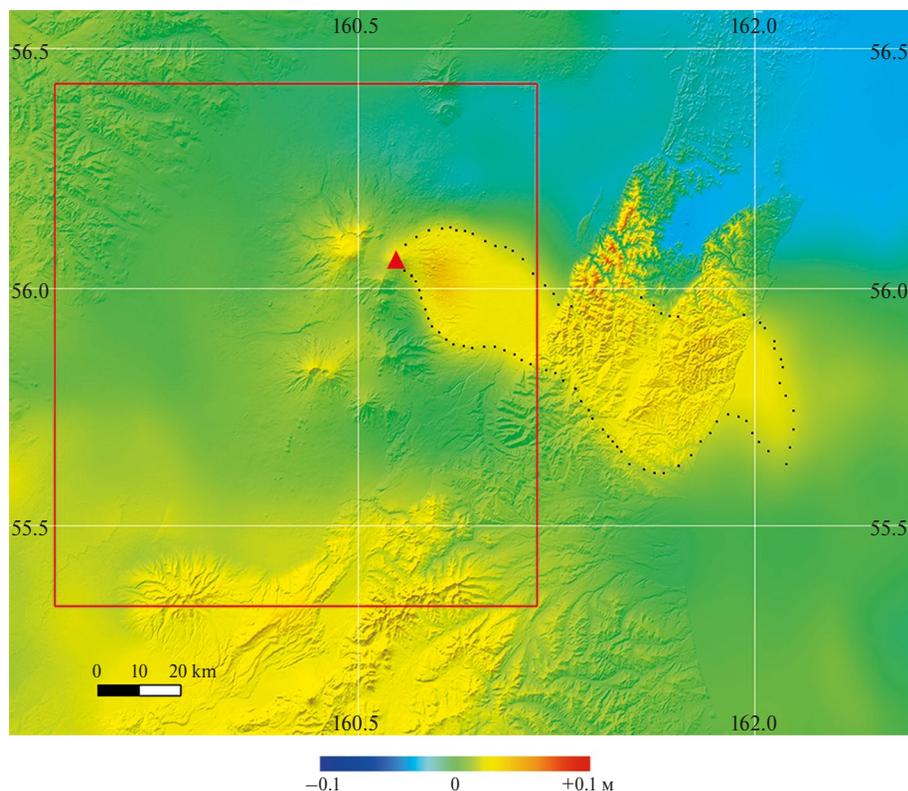


Рис. 7. Карта атмосферных поправок GACOS для пары снимков 04–16.09.2023. Красный прямоугольник – область расчета полей смещений. Красный треугольник – вулкан Ключевской.

тании поправки A_{gacos} в скорректированных интерферограммах проявились области смещений так же на восточном склоне вулкана Ключевской. Эти смещения чередуются по знаку во времени (третья колонка рис. 6) и достигают значений от $+3+5$ см до $-3-5$ см. При этом после введенных поправок во всех скорректированных интерферограммах полностью устранена тропосферная помеха и снизилось количество шума: корреляция с топографией для трех результатов равна 0.01, -0.13 , -0.04 , относительная дисперсия изменилась на 34.8%, 24.9% и 7.5%, соответственно. В четвертой колонке показаны карты атмосферных поправок по эмпирической модели, которые зависят в основном от рельефа и не содержат каких-либо существенных деталей. Скорректированные смещения по этой модели показаны в пятой колонке рис. 6. Отрицательный результат получен только для интерферограммы № 21 за счет появившихся пространственных трендов, которые вносят дополнительный шум в данные (см. вариограммы в приложении). Относительное изменение дисперсии для этого результата равно -35.88% , корреляция с топографией 0.17. Для остальных двух интерферограмм (№ 22, № 23) корреляция с топографией равна -0.09 и -0.13 , а улучшение точности смещений по изменению дисперсии получено 10.79% и 40.2% соответственно.

В обеих моделях поправок не скорректированы помехи, проявившиеся в правом нижнем углу интерферограммы № 22 (04.09–16.09.2023), которые, скорее всего, связаны с турбулентным перемешиванием атмосферы. Заметим, что для интерферограммы № 23 16.09–28.09.2023 результат коррекции с поправками эмпирической модели по статистическим критериям получен немного лучше, чем результат с поправками модели GACOS. Кроме того, добавленный при вычитании поправки GACOS сигнал в поле смещений не является деформационной составляющей. Согласно сообщениям группы KVERT – Kamchatka Volcanic Eruption Response Team (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2023-94>) 04.09.2023 (дата съемки снимка) наблюдался подъем мощной пепловой тучи с восточного склона вулкана Ключевской, шлейф которой распространялся на 95–170 км на восток. На рис. 7 показан более крупный фрагмент карты поправок GACOS для пары снимков 04–16.09.2023, на котором хорошо прослеживается протяженная в восточном направлении аномалия, соответствующая описанию распространения пепла.

На сегодняшний день погодная модель HRES, которая используется для онлайн сервиса GACOS, это самая точная модель, учитывающая максимальное количество параметров, связанных с состоянием

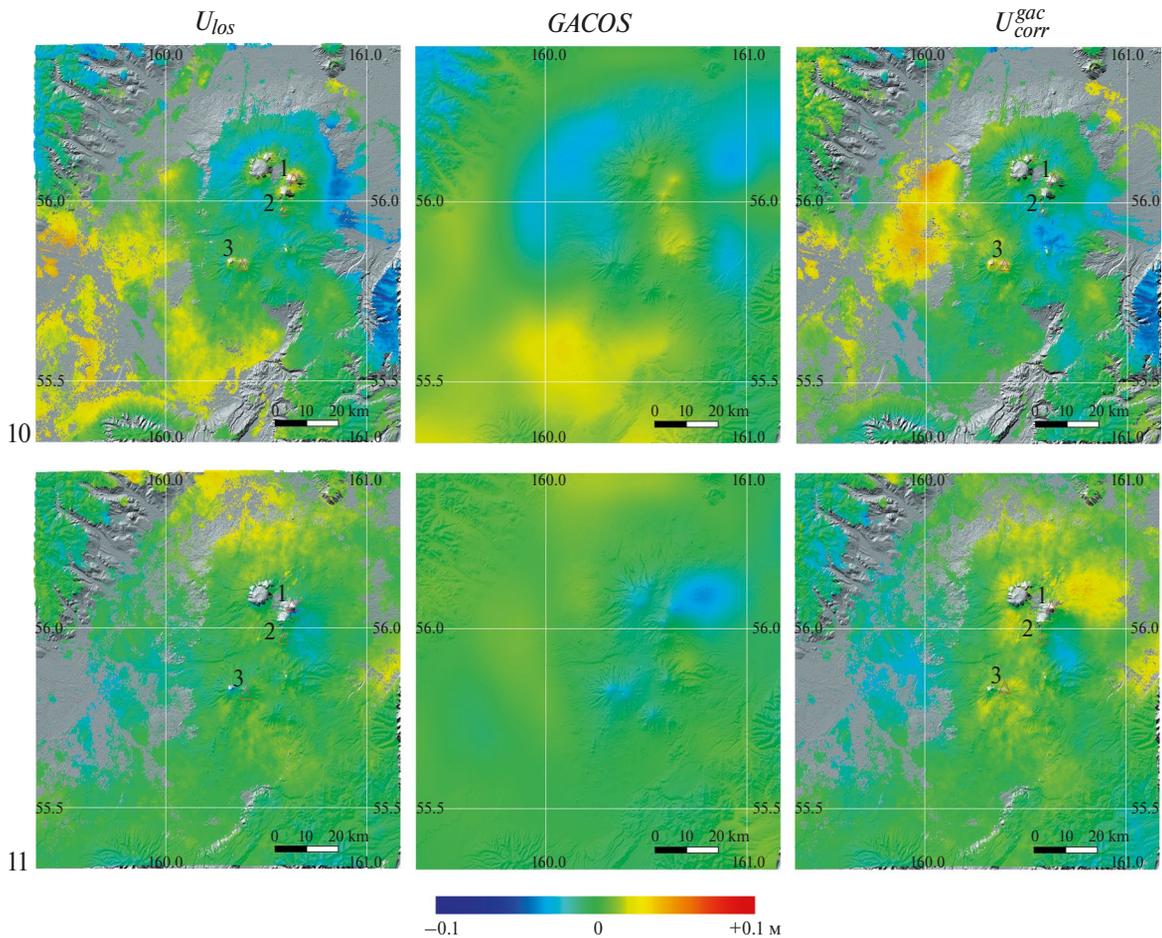


Рис. 8. Верхний ряд: слева поле смещений (11.07–04.08.2022), в центре – карта поправок A_{gacos} , справа – поле смещений после вычитания поправок A_{gacos} ($C(U_{corr}^{gac}) = -0.23$, $\delta_{Var}(U_{corr}^{gac}) = 21.27\%$). Нижний ряд: слева поле смещений (04.08–16.08.2022), в центре – карта поправок A_{gacos} , справа – поле смещений после вычитания поправок A_{gacos} ($C(U_{corr}^{gac}) = 0.21$, $\delta_{Var}(U_{corr}^{gac}) = -56\%$). Треугольниками отмечены вулканы: 1 – Ключевской, 2 – Безымянный, 3 – Толбачик.

атмосферы (<https://www.ecmwf.int/en/elibrary/81370-ifs-documentation-cy48r1-part-iv-physical-processes>). Это разные виды аэрозолей, эмиссия SO_2 и другие свойства, характерные, в том числе, для вулканических районов. В модель закладывается множество характеристик и физических процессов, используются сложные алгоритмы расчета температуры, давления, влажности и в целом модели погоды HRES. В то же время определенный состав аэрозолей, видимо, не являлся препятствием для распространения электромагнитной волны при выполнении снимка 04.09.2023 спутником Sentinel-1, иначе это было бы отражено в полученном сигнале интерферометрической фазы (рис. 6, исходные поля смещений в первой колонке). То есть GACOS фиксирует аномалии (или помехи), которые не проявляются в исходном поле смещений.

Примеры появления аномалий, отсутствующих в исходном поле смещений, можно наблюдать также в скорректированных по GACOS интерферо-

граммах № 10, № 11. На рис. 8 (верхний ряд) слева показано поле смещений, рассчитанное по интерферометрической паре № 10 11.07–04.08.2022. В центре рис. 8 (верхний ряд) показано карта атмосферных поправок A_{gacos} . В итоговом поле смещений (рис. 8, верхний ряд справа), после вычитания поправок из исходного поля смещений, устранен пространственный тренд, тропосферные помехи отсутствуют ($C = 0.23$), относительное изменение дисперсии составило 21%. При этом к западу от вулкана Толбачик, в долине реки Камчатка, выделилась область поднятий до 5 см, которая связана с эквивалентным артефактом на карте поправок A_{gacos} .

В нижнем ряду рис. 8 так же показано слева поле смещений, рассчитанное по интерферометрической паре № 11 04.08–16.08.2022. В юго-восточном направлении от вулканов Ключевской, Безымянный видна область смещений до 2 см от спутника. В центре рис. 8 (нижний ряд) карта ат-

мосферных поправок A_{gacos} , на которой выделяется область отрицательных значений, простирающаяся на северо-восток от вулкана Ключевской. После вычитания поправки из исходного поля смещений, в результате проявилась положительная аномалия на СВ от Ключевского, и более четко выделилась отрицательная аномалия на ЮВ от Ключевского. Значения выявленных смещений достигают +3 см и -3 см соответственно (см. рис. 8 справа, нижний ряд). При том, что трендовая пространственная составляющая отсутствует и выраженных тропосферных помех не наблюдается ($C = 0.21$), относительное изменение дисперсии скорректированных смещений составило -56%, т.е. дисперсия заметно возросла, что говорит о внесении дополнительной помехи в итоговый результат. Такие области “деформаций” требуют отдельной проверки и интерпретации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ эффективности двух моделей атмосферных поправок (GACOS и эмпирической погодной модели атмосферы) и выполнена оценка их влияния на поля смещений, рассчитанные по спутниковым радиолокационным снимкам. Положительный результат, удовлетворяющий условиям уменьшения шума и снижению тропосферного эффекта после коррекции полей смещений получен для 74% интерферограмм с поправкой GACOS, а по эмпирической погодной модели положительный эффект получен для 48% интерферограмм.

Для оценки пространственных трендов были рассчитаны вариограммы по четырем направлениям. Анализ анизотропии вариограмм показал, что поправка GACOS намного эффективнее устраняет пространственный тренд, в сравнении с поправками эмпирической модели. В скорректированных поправками GACOS смещениях тренд в одном или нескольких направлениях наблюдается на 6 из 23 итоговых картах, в то время как поправки эмпирической модели пространственный тренд почти не учитывают.

Точность результата введенной поправки рассчитывалась с использованием стандартного отклонения. Для полей смещений с атмосферной поправкой по эмпирической модели заметного улучшения точности добиться не удалось. Стандартное отклонение уменьшилось с 1.7 до 1.65 см. С применением поправки GACOS стандартное отклонение в среднем уменьшилось до 1.2 см. В то же время если сравнивать атмосферные поправки по критериям уменьшения тропосферного эффекта ($C_{corr} \leq 0.3$) и уменьшения общей помеховой составляющей ($\delta_{var} > 0$), то поправки A_{meteo} показали лучший эффект, чем поправки A_{gacos} , для четырех интерферограмм (№№ 5, 6, 15, 23 в табл. 2)

при выполнении условия $\delta_{var}(U_{corr}^{met}) > \delta_{var}(U_{corr}^{gac})$, и для пяти интерферограмм (№№ 5, 15, 16, 18, 22) при выполнении условия $C(U_{corr}^{met}) < C(U_{corr}^{gac})$, хотя в большинстве случаев улучшения не велики и по критерию уменьшения тропосферного эффекта результаты поправок сопоставимы.

Было обнаружено, что в некоторых случаях модель GACOS фиксирует пепловые облака и шлейфы, которые просвечиваются радаром 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 интерпретации.

Карты поправок по эмпирической модели атмосферы представляют собой более однородные данные, отражающие лишь связь с местной топографией, но совсем не учитывающие особенности вулканического района. В районе действующих активных вулканов (КГВ) присутствуют термальные аномалии на склонах, также важно, что КГВ это район крупнейших ледников (ледники Эрмана, Богдановича, Бильченков,...). Все это эмпирическая модель не учитывает, поэтому поправки могут не соответствовать реальным условиям. С другой стороны, эмпирическая модель не учитывает загрязнение атмосферы пепловыми аэрозолями, которые по различным причинам не отражаются в поле смещений. Поэтому модель атмосферных поправок, рассчитанная по данным местных локальных метеостанций, которые не входят в международный синоптический список, полезна для дополнения и развития методов устранения атмосферной компоненты интерферометрической фазы.

Заметим, что вулканические районы с расчлененным высокогорным рельефом представляют собой крайне трудные области для применения спутниковой радарной интерферометрии. Надежная оценка смещений по одной парной интерферограмме в ряде случаев оказывается невозможной. Здесь существенную помощь могут оказывать методы анализа серии интерферограмм, такие как методы распределенных отражателей SBAS, или даже простое суммирование последовательных интерферограмм. Атмосферные эффекты быстро меняются во времени, а деформационные сигналы остаются стабильными или могут накапливаться. Анализ серий последовательных интерферограмм позволяет существенно подавлять атмосферные и иные помехи (связанные с неточным заданием орбит, цифровой модели рельефа, аппаратурными шумами). Также эффективным является анализ полей смещений, полученных по снимкам с восходящих и нисходящих орбит.

Выполненное исследование показало, что несмотря на относительно небольшое число метеостанций и стационарных пунктов GPS, передающих данные в международные базы данных в Камчатском регионе, модели GACOS во многих случаях позволяют эффективно устранять атмосферные помехи и повышать точность оценки полей смещений. С другой стороны, в ряде случаев поправки могут вносить дополнительные помехи, поэтому мы не рекомендуем использовать атмосферные поправки по умолчанию, без сопоставления исходного и скорректированного полей смещений, с особым вниманием проводить анализ смещений, которые появились после введения поправок.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Волкова М.С., Михайлов В.О., Горбач Н.В. О природе деформаций западного склона вулкана Шивелуч после изверже-

ния 11 апреля 2023 г., выявленных методами РСА интерферометрии // Доклады, Науки о Земле. 2024а. Т. 518. № 10. С. 114–124.

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. 2024б. Т. 21. № 2. С. 9–22. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-9-22.

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. 3–11.

Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика: теория и практика. М.: Наука, 2010. 327 с.

Ковалевский Е.В. Геологическое моделирование на основе геостатистики. EAGE. 2011. 117 с.

Михайлов В.О., Волкова М.С., Тимошкина Е.П., Шапиро Н.М., Смирнов В.Б. О связи активизации вулкана Корякский в 2008–2009 гг. с глубинными магматическими процессами // Физика Земли. 2021. № 6. С. 3–9. DOI: 10.31857/S0002333721060041.

Chiles J., Delfiner P. Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty. Wiley, New York. 1999. 695 p.

Yu C., Li Z., Penna N.T. 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.

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>.

Comparison of Atmospheric Corrections Models to Satellite Interferometry Data on Kamchatka Region

M. S. Volkova¹, V. O. Mikhailov¹, R. S. Osmanov¹

¹*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

In this paper, a comparative analysis of the results of applying atmospheric corrections to real displacement fields calculated by differential interferometry for the volcanic region of Kamchatka during the active phase of eruptions accompanied by significant changes in the atmospheric composition is carried out. Atmospheric corrections were calculated in two ways: 1) according to phase delay data from the online service GACOS (Generic Atmospheric Corrections Online Service), 2) by delays calculated using an empirical weather model based on data from local meteorological and GNSS stations in Kamchatka. An analysis of the effectiveness of each correction model was carried out and an assessment of their impact on the displacement fields was made. The positive result satisfying the conditions of noise reduction and tropospheric effect decrease was obtained for 74% of interferograms with GACOS correction, and for 48% of interferograms corrected using the empirical weather model. In some cases, the empirical model corrections were more accurate than the GACOS corrections. The analysis of the influence of atmospheric corrections on the displacement field has shown that in some cases the GACOS model introduces changes in the displacement field, forming regions of positive or negative anomalies that have no connection with the original displacement field. The atmospheric correction model, calculated from data of regional local meteorological stations that are not included in the international synoptic list, is useful for supplementing and developing methods for eliminating the atmospheric component of the interferometric phase. The performed study showed that in the Kamchatka region, GACOS models in many cases effectively eliminate atmospheric noise and

improve the precision of the estimation of displacement fields. On the other hand, in some cases the corrections may introduce additional noise, so we do not recommend using default corrections without comparing the original and corrected displacement fields, with special attention to analysing the displacements that appeared after the introduction of corrections.

Keywords: satellite interferometry, synthetic aperture radar (SAR), Kamchatka, atmospheric corrections, geostatistics, variogram

REFERENCES

- Chiles J., Delfiner P.* Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty. Wiley, New York. 1999. 695 p.
- Dem'yanov V.V., Savel'eva E.A.* Geostatistika: teoriya i praktika [Geostatistics: theory and practice]. Moscow: Nauka, 2010. 327 p. ISBN 978-5-02-037478-2. (In Russian).
- Kovalevskiy E.V.* Geologicheskoe modelirovanie na osnove geostatistiki [Geological modelling on the base of geostatistics] // EAGE. 2011. 117 p. (In Russian).
- Mikhailov V.O., Volkova M.S., Timoshkina E.P., Shapiro N., Smirnov V.B.* On the Connection between the 2008–2009 Activation of the Koryakskii Volcano and Deep Magmatic Processes // *Izv., Phys. Solid Earth* 57, 819–824 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1069351321060045>.
- Volkova M.S., Mikhailov V.O., Gorbach N.V.* The Nature of Deformations of the Western Slope of Shiveluch Volcano after the Eruption on April 11, 2023, Identified by SAR Interferometry // *Doklady Earth Sciences*. 2024a. V. 518. P. 1723–1731. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24602694>.
- Volkova M.S., Mikhailov V.O., Osmanov R.S.* Analysing the efficiency of the global weather model HRES (GACOS) for correction of atmospheric noise in interferometric estimates of displacement fields on the example of volcanoes in Kamchatka // *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2024b. V. 21(#2). P. 9–22. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-2-9-22>. (In Russian).
- Volkova M.S., Mikhailov V.O., Osmanov R.S.* Estimation of the precision of atmospheric phase delay models for displacement fields on Kamchatka region calculated by the differential interferometry method // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2025. № 3. P. 3–10.
- Yu C., Li Z., Penna N.T.* 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.
- 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>.