

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРНЫХ ФАЗОВЫХ
ЗАДЕРЖЕК ДЛЯ ПОЛЕЙ СМЕЩЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ КАМЧАТКИ,
РАССЧИТАННЫХ МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

© 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 рассмотрены различные способы расчета атмосферных фазовых задержек для коррекции интерферометрической фазы, по которой методами спутниковой радиолокационной интерферометрии рассчитываются смещения земной поверхности. По данным Камчатских метеостанций построена локальная эмпирическая погодная модель, основанная на эмпирических зависимостях физических свойств атмосферы от высоты, и по этой модели рассчитаны задержки распространения электромагнитного сигнала. Далее оценена точность эмпирической погодной модели и модели GACOS (Generic Atmospheric Corrections Online Service), путем сопоставления их с задержками, рассчитанными по сети станций ГНСС Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН 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 лежат в диапазоне от 0 до 5.7%, а для задержек GACOS относительные невязки не превышают 1.6%. При этом, для моделей GACOS и эмпирической погодной модели в среднем относительная невязка равна 0.3% и 0.9% соответственно, а среднеквадратические ошибки 0.6 см и 2.3 см. В целом, в точках расположения пунктов ГНСС, получена достаточно хорошая точность расчетов: погрешность менее 1%, а также очень высокий коэффициент детерминации зависимостей сравниваемых моделей, практически соответствующий коэффициенту корреляции, равному 1. Кроме того, для 25% результатов получено, что эмпирическая модель превосходит по точности модель GACOS, т.е. величины задержек ближе к задержкам, рассчитанным по измерениям на пунктах ГНСС. Поскольку половина метеостанций и пунктов ГНСС, по которым рассчитывалась эмпирическая погодная модель — это локальные станции Камчатской сети, которые не входят в глобальные сети, полученные результаты дают независимую оценку точности поправок с сайта GACOS на территорию полуострова. Результаты проведенного исследования также показывают, что построенная в работе эмпирическая модель атмосферы обеспечивает хорошую точность расчетов в точках расположения пунктов ГНСС и их данные позволяют с высокой точностью рассчитать атмосферные задержки для полей смещений земной поверхности, полученные методами спутниковой интерферометрии.

Ключевые слова: спутниковая интерферометрия, радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), Камчатка, GACOS, атмосферные задержки, погодная модель

DOI: 10.7868/S3034540525030014

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковая радиолокационная интерферометрия широко применяется для изучения вулканов и вулканических процессов. Одним из самых активных вулканических районов является Камчатка, но в то же время это и один из самых сложных районов для применения интерферометрии. Частая и резкая смена погодных условий, сильно расчлененный рельеф, мощный снежный покров в течение значительной части года, все это создает сильные помехи в интерферометрической фазе, по которой

определяются смещения земной поверхности. Для выделения компоненты смещений выполняется последовательное устранение шумов и различного рода помех, но при этом сложнее всего отделить помехи, связанные с изменением физических свойств атмосферы. Содержание водяного пара в атмосфере приводит к задержкам фазового сигнала при распространении электромагнитной волны. В настоящее время не существует способов для измерения атмосферной задержки, позволяющих полностью исключить ее влияние на интерферограмму. Фазовые компоненты, связанные с влиянием атмо-

феры могут привести к ошибочной интерпретации полученного поля смещений.

Одним из подходов к устранению атмосферной составляющей является применение онлайн сервиса GACOS (Generic Atmospheric Corrections Online Service), который предоставляет карты зенитных абсолютных фазовых задержек в метрах на любую территорию и дату. Для расчета задержек распространения сигнала в атмосфере, GACOS использует высокоточную погодную модель HRES (High Resolution) с высоким разрешением по пространству (0.125°) совместно с данными станций GPS, передающих информацию в мировые центры. Совместное использование модели погоды и GPS позволяет разделить атмосферную помеху на две составляющие: тропосферную (стратифицированную из-за изменения физических свойств атмосферы по высоте) и турбулентную (Yu et al., 2017, 2018). Поскольку на Камчатке сеть GPS станций не слишком плотная, особенно в ее северной части, расчеты GACOS на данный район ограничены только данными погодной модели HRES. Ранее в работе (Волкова и др., 2024) исследована эффективность применения карт абсолютных фазовых задержек онлайн-сервиса GACOS для коррекции полей смещений, рассчитанных по снимкам спутника Sentinel-1A на вулканические районы северной, центральной и южной Камчатки. Было показано, что в ряде случаев тропосферная компонента удаляется не полностью, в то время как турбулентная компонента и деформационная составляющая остаются в скорректированных результатах практически без изменений. В отдельных случаях учет атмосферной поправки GACOS приводит к существенному увеличению помех в поле смещений. В связи с выявленными проблемами применения поправок GACOS мы исследовали дополнительные способы учета атмосферных задержек.

В этой работе мы построили локальную эмпирическую погодную модель по данным Камчатских метеостанций и по этой модели рассчитали задержки распространения электромагнитного сигнала в атмосфере. Далее мы оценили точность эмпирической погодной модели и модели GACOS. Для этого мы рассчитали атмосферные задержки по данным ГНСС (глобальная навигационная спутниковая система) станций в пунктах их расположения. Мы приняли гипотезу о том, что задержки по ГНСС данным содержат наименьшие погрешности, и использовали их для сравнения полученных атмосферных задержек по эмпирической модели и задержек по модели GACOS.

Важно, что не все локальные пункты ГНСС и местные метеостанции Камчатки входят в глобальную сеть наблюдений, которая используется для расчета модели GACOS, поэтому результаты

рассчитанных атмосферных задержек по локальной эмпирической модели и оценки точности будут полезны в развиваемой методике устранения атмосферных помех при расчете полей смещений методом интерферометрии на территорию Камчатки.

Анализ результатов применения атмосферных коррекций по двум моделям (GACOS и эмпирической погодной модели) при расчете полей смещений по снимкам спутника Sentinel-1 на территорию Камчатки выполнен в отдельной публикации (Волкова и др., 2025).

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для исследований мы выбрали район Ключевской группы вулканов (КГВ), расположенный в северной части Камчатской депрессии, поскольку этот район охватывается одновременно всеми видами необходимых для данного исследования наблюдений: радиолокационной съемкой, наземными измерениями в пунктах ГНСС и измерениями параметров атмосферы на сети метеостанций.

Поскольку карты абсолютных фазовых задержек применяются для устранения атмосферных помех из полей смещений, рассчитанных по данным спутниковой интерферометрии, то наши расчеты всех задержек (ГНСС, GACOS, модель по метеостанциям Камчатки) привязаны к датам и времени съемки спутником Sentinel-1 территории КГВ.

На рис. 1 показаны: положение станций ГНСС (черные точки), метеостанций (синие точки) и область исследования (зеленый контур).

Данные станций ГНСС, предоставленные КФ ФИЦ ЕГС РАН, содержат временные ряды шести пунктов (ATLS, BZ07, BZGD, KLU1, KOZS, MAYS) за 2021, 2022, 2023 годы в периоды времени с апреля по август в формате RINEX. Обработка временных рядов ГНСС проводилась в программном пакете PRIDE PPP AR (Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution) открытого доступа (Geng et al., 2019). Измерения выполнены с интервалом 30 секунд, что позволяет рассчитать абсолютную зенитную задержку ΔL_{gnss} на момент времени, максимально приближенный ко времени выполнения спутникового снимка ($\sim 19:40$ UTC). В табл. 1 указаны даты (UTC) выполнения спутником Sentinel-1 радиолокационной съемки территории Камчатки с 60-й орбиты. На эти даты рассчитаны зенитные задержки ΔL_{gnss} (м) в пунктах расположения станций.

На эти же даты из онлайн-сервиса GACOS были получены карты зенитных абсолютных фазовых задержек ΔL_{gacos} (м) на всю область исследования.

Для расчета атмосферных задержек на основе эмпирической погодной модели была построена

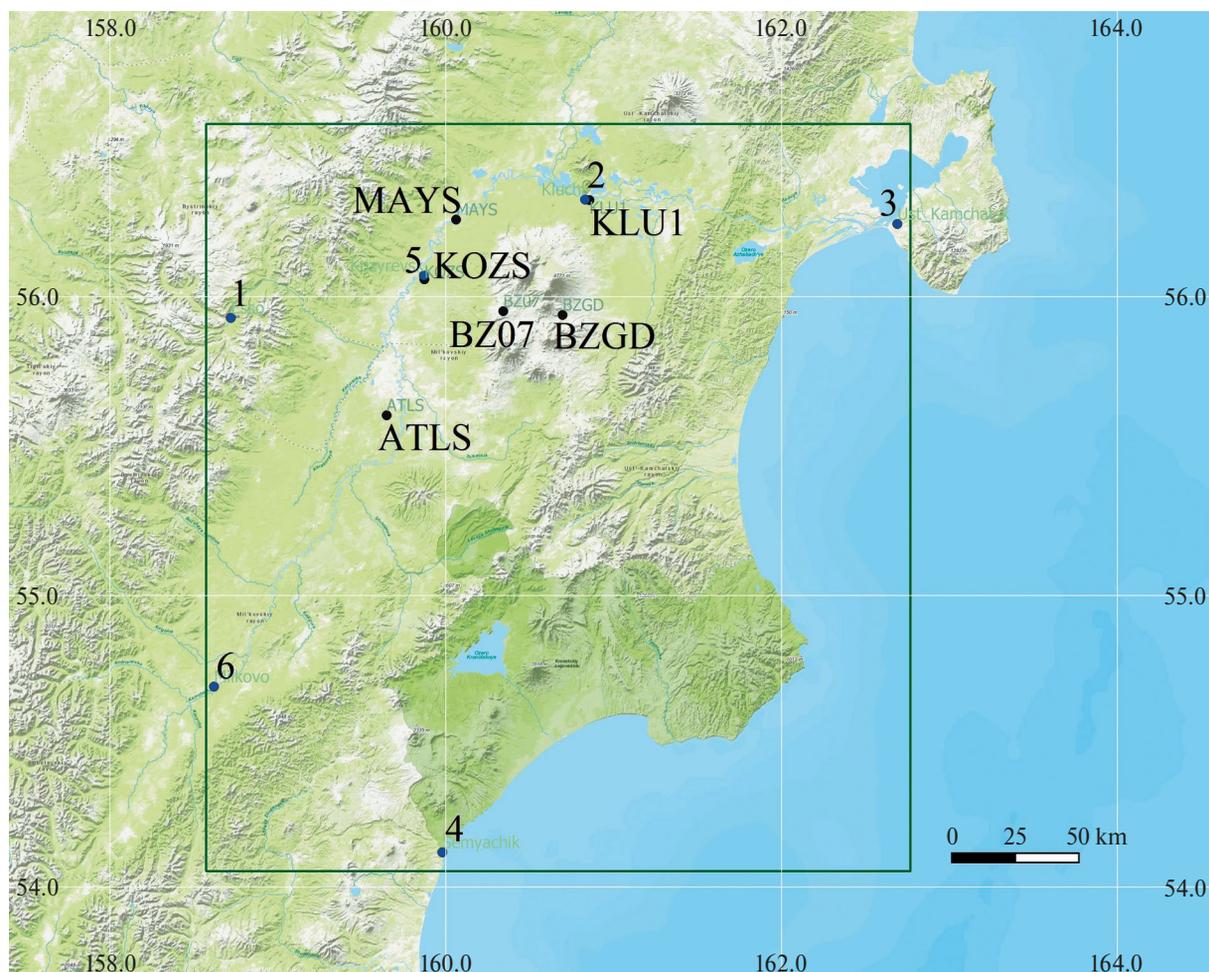


Рис. 1. Область исследований (зеленый контур), синие точки, обозначенные цифрами – метеостанции (1 – Эссо, 2 – Ключи, 3 – Усть-Камчатск, 4 – Семячик, 5 – Козыревск, 6 – Мильково); черные точки – станции ГНСС (ATLS, BZ07, BZGD, KLU1, KOZS, MAYS). Метеостанции 2, 3, 4 входят в глобальную международную сеть, остальные – нет.

Таблица 1. Даты (UTC), на которые выполнены расчеты атмосферных задержек

№	2021	№	2022	№	2023
1	11.04.2021	13	06.04.2022	24	01.04.2023
2	23.04.2021	14	18.04.2022	25	13.04.2023
3	05.05.2021	15	30.04.2022	26	25.04.2023
4	17.05.2021	16	24.05.2022	27	07.05.2023
5	29.05.2021	17	05.06.2022	28	19.05.2023
6	10.06.2021	18	17.06.2022	29	12.06.2023
7	22.06.2021	19	29.06.2022	30	24.06.2023
8	04.07.2021	20	11.07.2022	31	06.07.2023
9	16.07.2021	21	04.08.2022	32	18.07.2023
10	28.07.2021	22	16.08.2022	33	11.08.2023
11	09.08.2021	23	28.08.2022	34	23.08.2023
12	21.08.2021				

модель атмосферы по данным шести локальных метеостанций Камчатки (в скобках указан номер станции): Эссо (32363), Ключи (32389), Усть-Камчатск (32408), Семячик (32509), Козыревск (32379), Мильково (32496) (рис. 1). Для этого мы использовали подход, основанный на изменении по вертикали атмосферного коэффициента рефракции в зависимости от давления, температуры и содержания водяного пара в атмосфере (Delacourt et al., 1998; Hansen, 2001; Doin et al., 2009 и другие). В терминах абсолютного атмосферного давления и температуры, атмосферная рефракция может быть выражена как (например, Hanssen, 2001 и др.):

$$N = k_1 P/T + (k_2' e/T + k_3 e/T^2), \quad (1)$$

где P – абсолютное атмосферное давление в гПа, e – парциальное давление водяного пара в гПа, T – абсолютная температура в градусах Кельвина. Константы k_1 , k_2' , k_3 , следуя работе (Hanssen, 2001), заданы как $k_1 = 77.6$ К гПа⁻¹, $k_2' = 23.3$ К гПа⁻¹, $k_3 = 3.75 \cdot 10^5$ К² гПа⁻¹. Ниже во всех формулах давление задается в гПа (1 гектопаскаль = 100 Па), температура в градусах Кельвина, высота в метрах.

В данной работе мы не рассматриваем задержки в ионосфере, поскольку диапазон длин волн (С) спутника Sentinel-1 слабо подвержен влиянию ионосферы, но сильно подвержен искажениям, вызванным влиянием тропосферы. В этом случае в выражении (1) первое слагаемое – это “гидростатическая компонента”, $N_{hyd} = k_1 P/T$, а второе – “влажная компонента” $N_{wet} = k_2' e/T + k_3 e/T^2$. Учитывая, что слагаемое $k_2' e/T$ мало и вносит изменение в решение не более 0.1% (Baby et al., 1988), этим слагаемым в выражении (1) можно пренебречь. Тогда, интегрируя (1) в слое тропосферы по высоте z от поверхности Земли z_0 , получим избыточный путь в метрах, пройденный электромагнитной волной по вертикали:

$$\Delta L = 10^6 \int_{z_0}^{z_{trop}} \left(k_1 \frac{P(z)}{T(z)} + k_3 \frac{e(z)}{T(z)^2} \right) dz = \Delta L_{hyd} + \Delta L_{wet}. \quad (2)$$

Рассматривая тропосферу как идеальный газ в гидростатическом равновесии: $P = \rho R_d T$ (ρ – плотность идеального газа кг/м³, $R_d = 287.053$ Дж/(К кг) – газовая постоянная) и $P(z_{trop}) = g \int_{z_0}^{z_{trop}} \rho(z) dz$ (g – ускорение силы тяжести), получаем итоговое выражение для гидростатической компоненты задержки фазового атмосферного сигнала, зависящей от давления.

$$\Delta L_{hyd} = 2.273 \times 10^3 \times P(z). \quad (3)$$

Для влажной компоненты ΔL_{wet} существуют разные соотношения, основанные на измерении метеорологических параметров. Согласно, например,

работе (Delacourt et al., 1998), мы используем следующую зависимость ΔL_{wet} от температуры воздуха и парциального давления водяного пара:

$$\Delta L_{wet} = 2.277 \times 10^3 \times (0.005 + 1255/T(z)) \times e(z). \quad (4)$$

Эта зависимость верна в предположении, что $e(z)$ убывает с высотой экспоненциально, а $T(z)$ линейно. Определение функций $e(z)$ и $T(z)$ дано ниже.

Таким образом, для расчета компонентов полной атмосферной задержки (формулы (3) и (4)) необходимо рассчитать карты физических параметров атмосферы (давление, температура, парциальное давление водяного пара) с учетом топографии в момент времени t по данным наземных метеорологических станций. Для этого из базы данных сайта gr5.ru получены архивные данные метеорологических измерений (температура T (С), давление P (гПа), относительная влажность u (%)) по шести перечисленным выше метеостанциям полуострова Камчатка. Поскольку измерения метеопараметров регистрируются с шагом по времени 3 часа (0:00, 3:00, 6:00, 9:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00), они были проинтерполированы на время съемки спутникового снимка (19:40 UT) между 18:00 и 21:00 UT. Наземные значения параметров зависят от локальной высоты рельефа z в точке измерения и могут быть выражены через эмпирические функции со значениями на уровне моря $T(0)$, $P(0)$, $U(0)$. Стандартный вертикальный градиент температуры с высотой равен -0.00645 К/м. Соответственно,

$$T(z) = T(0) - z \times 0.00645. \quad (5)$$

Для определения давления мы используем выражение (например, Delacourt et al., 1998; Doin et al., 2009):

$$P(z) = P(0) \times (1 - z \times 2.26 \times 10^{-5})^{5.225}, \quad (6)$$

Парциальное давление водяного пара равно:

$$e(z) = e_s(z) \times u(z)/100, \quad (7)$$

где $e_s(z)$ – парциальное давление насыщенного пара (гПа) может быть найдено, используя один из многих эмпирических законов. При невысоких температурах эти законы не дают существенного различия в определении $e_s(z)$. Например, формула (Tetens, 1930) и закон Клапейрона – Клаузиуса, и др., при изменении температуры от отрицательных значений до +20 градусов (С) дают различия в расчетных величинах давления в 1%, а при увеличении температуры до 40° не более 4%. В расчетах парциального давления насыщенного пара мы использовали формулу (Tetens, 1930):

$$e_s(z) = 6.1078 \times \exp(17.27T(z) / (T(z)+237.3)). \quad (8)$$

При этом из-за трудности хотя бы приближенного описания изменения вертикально профиля влажности, так же, как и в работах (Baby et al., 1988;

Delacourt et al., 1998), мы приняли допущение, что относительную влажность можно считать константой $u(z) = u(0)$ на всех уровнях z .

Важным является выбор метода интерполяции метеопараметров по площади, от которого критически зависит итоговая расчетная модель атмосферных задержек. Мы использовали сплайн типа тонкой пластины на триангуляционной сетке (Thin plate spline TIN – triangulated irregular network). Он имеет достаточно жесткие ограничения по кривизне, поэтому можно добиться выполнения важного условия: в интерполируемом пространстве и в области экстраполяции результаты не должны существенно выходить за диапазон измеренных значений.

Рассчитав параметры атмосферы в каждой точке пространства (формулы (5)–(8)) и вычислив гидростатическую и влажную компоненты задержки фазового сигнала в тропосфере (формулы (3), (4)), теперь можно рассчитать общую зенитную фазовую задержку (формула (2)) на дату съемки спутникового снимка t_i . Обозначим ее ΔL_{meteo} .

Как уже было сказано, мы полагаем, что задержки, рассчитанные по измерениям ГНСС в пунктах расположения станций, имеют минимальную погрешность и могут быть приняты как эталонные. Поэтому все рассчитанные задержки по моделям (ΔL_{gacos} и ΔL_{meteo}) мы сопоставляем с данными шести ГНСС станций.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На район исследования были рассчитаны карты зенитных атмосферных задержек по данным GACOS и карты задержек по данным эмпирической погодной модели, использующей измерения метеопараметров на шести метеостанциях Камчатки. Также по данным измерений шести станций ГНСС, установленных в районе Ключевской группы вулканов, были рассчитаны зенитные задержки в точках с координатами станций. Расположение метеостанций и станций ГНСС совпадает только в двух пунктах – Козыревск (KOZS) и Ключи (KLU1).

Результаты расчета абсолютных задержек по ГНСС показаны на рис. 2. Существенно отличаются от общего фона величины зенитных задержек на станциях BZ07 и BZGD (красная и зеленая линии). Это объясняется тем, что станции BZ07 и BZGD расположены на более высоком рельефе у западного и восточного склонов вулкана Безымянный соответственно, в то время как остальные четыре станции распределены в долине вдоль русла реки Камчатка (см. рис. 1).

В целом значения фазовых задержек, рассчитанные с использованием сервиса GACOS (ΔL_{gacos})

и эмпирической модели (ΔL_{meteo}), очень близки к значениям, измеренным по ГНСС (ΔL_{gnss}). На рис. 3 показана мера корреляционной связи значений “ $\Delta L_{gnss} - \Delta L_{meteo}$ ” (рис. 3а) и “ $\Delta L_{gnss} - \Delta L_{gacos}$ ” (рис. 3б) с очень высокой степенью детерминации. При этом выделяются два кластера: нижний соответствует расположению станций BZ07, BZGD у склонов вулкана Безымянный, верхний – результаты в остальных четырех пунктах (ATLS, KLU1, KOZS, MAYS). Также на рис. 3а в данных эмпирической модели наблюдаются незначительные выбросы, как в нижнем, так и в верхнем кластере, которые можно идентифицировать по относительным невязкам на рис. 4.

На рис. 4 показаны относительные невязки в процентах. В невязках между эмпирической моделью атмосферы и ГНСС (рис. 4, левая колонка) выделяются группы станций с повышенными ве-

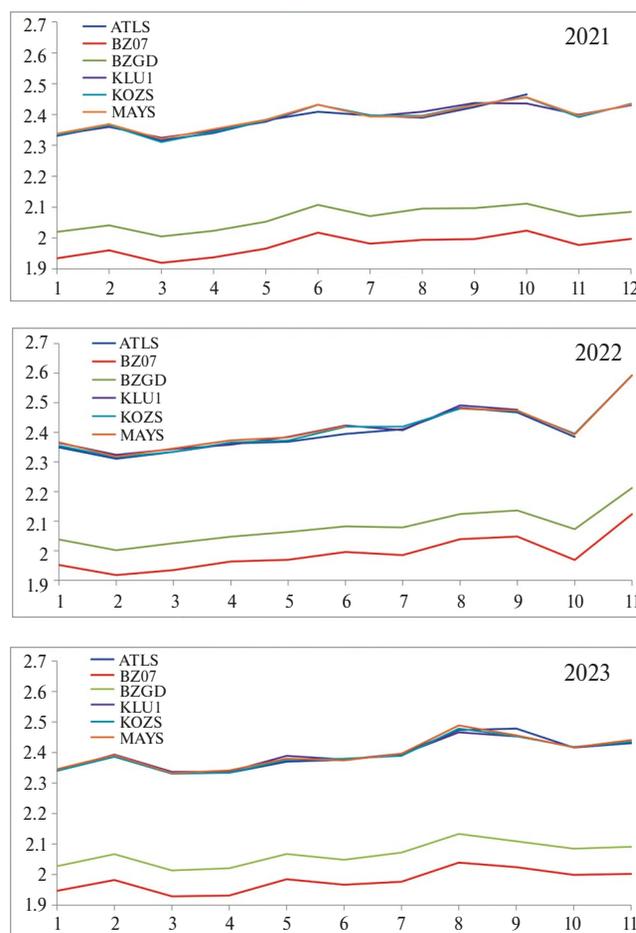


Рис. 2. Атмосферные зенитные задержки, рассчитанные в пунктах ГНСС (ATLS, BZ07, BZGD, KLU1, KOZS, MAYS) по данным каждой из этих станций на даты, приведенные в таблице 1. По горизонтальной оси отложены номера моментов времени, на которые выполнялась обработка, по вертикальной – величина рассчитанной задержки в метрах.

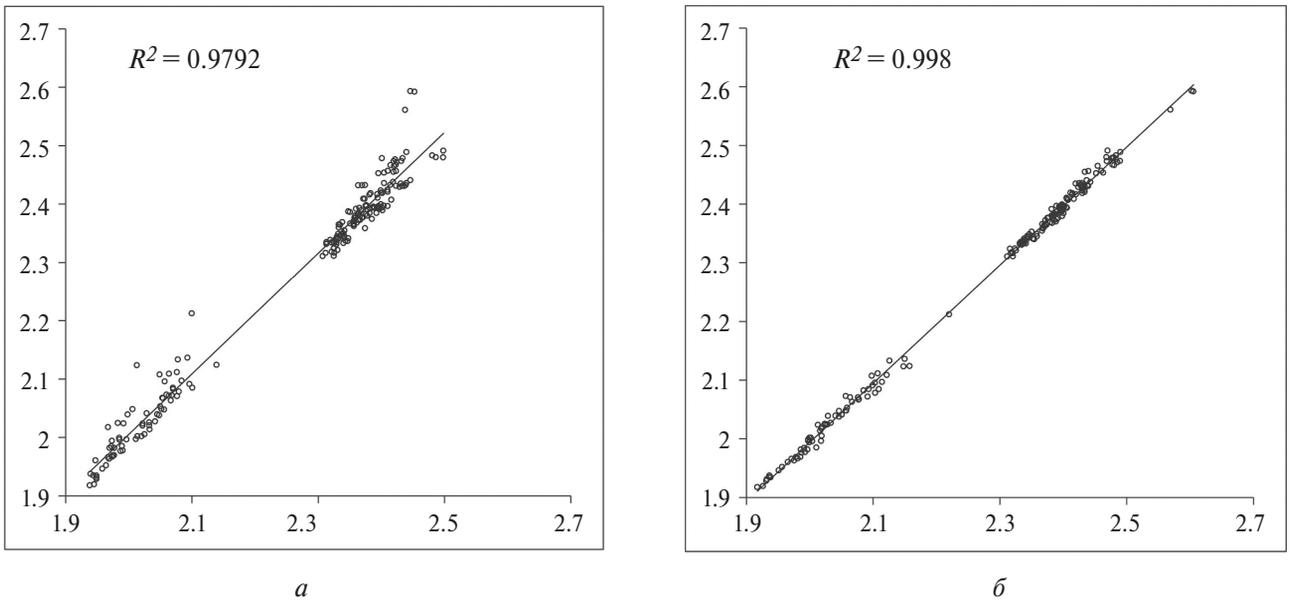


Рис. 3. Сопоставление атмосферных фазовых задержек, рассчитанных по погодным моделям, с задержками по данным ГНСС станций. По вертикальной оси отложены задержки, рассчитанные по данным ГНСС на 34 даты (табл. 1), по горизонтальной оси: задержки, рассчитанные по эмпирической модели (а) и задержки, полученные по модели GACOS (б). R^2 – коэффициент детерминации.

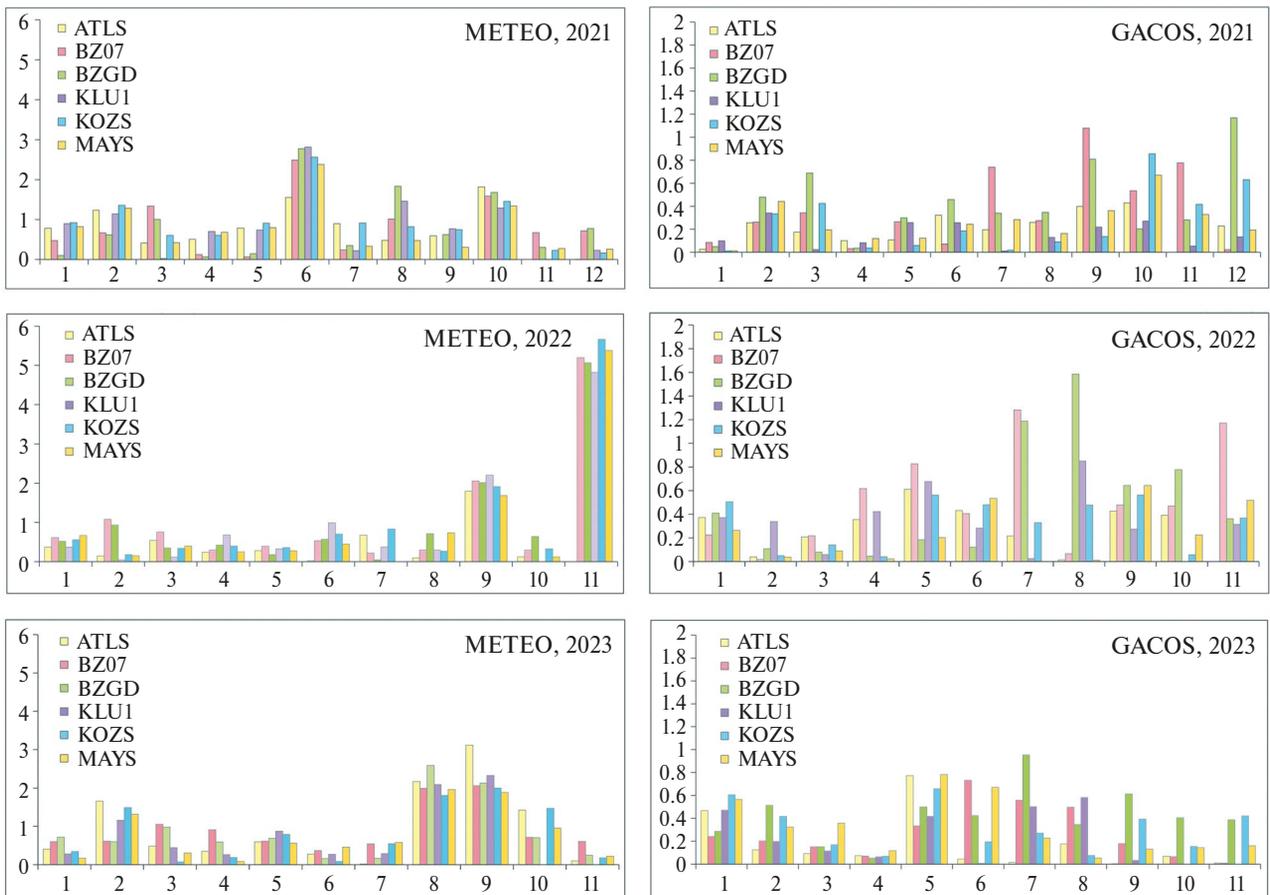


Рис. 4. Относительные невязки (%). Каждая станция обозначена своим цветом. Масштаб на диаграммах слева и справа различный.

личинами относительных невязок, полученные на следующие даты измерений: 10.06.2021 (на горизонтальной оси это № 6), 04.08.2022 и 28.08.2022 (№ 9 и 11), 06.07.2023 и 18.07.2023 (№ 8 и 9). Для модели GACOS (рис. 4, правая колонка) таких характерных отклонений одновременно для всех пунктов ГНСС не выявляется. Выделяются только две станции на склонах вулкана Безымянный в 2021 и в 2022 году (BZ07, BZGD – станции, отмеченные красным и зеленым цветом на диаграммах). Максимальная относительная невязка между атмосферными задержками GACOS и данными ГНСС равна 1.6% (для пункта BZGD, 11.07.2022, № 8 на горизонтальной оси). Для этой же расчетной точки невязка задержек по эмпирической модели составляет всего 0.7%, однако максимальная невязка эмпирической модели в целом достигает 5.7% (для пункта KOZS, 28.08.2022, № 11). Тем не менее, средние величины относительной невязки по всей выборке для обеих моделей не превышают 1%. Следовательно, расчеты по моделям атмосферы согласуются с высокой точностью с данными по шести пунктам ГНСС.

Таблица 2. Критерии оценки точности атмосферных задержек, рассчитанных по эмпирической модели и по модели GACOS в сопоставлении с задержками, рассчитанными по ГНСС, принятыми за эталонные (истинные)

Статистика	ΔL_{meteo}	ΔL_{gacos}
Среднеквадратическая ошибка, м	0.023	0.006
Максимальная относительная невязка $r, \%$	5.7	1.6
Максимальная абсолютная невязка, м	0.147	0.034
Средняя относительная невязка $r, \%$	0.88	0.32
Средняя абсолютная невязка, м	0.020	0.007
Коэффициент детерминации	0.978	0.998

Также мы оценивали точность расчета атмосферных зенитных задержек по среднеквадратической ошибке, которая по всем данным для модели GACOS составила 6 мм, а для эмпирической модели – 23 мм.

В табл. 2 приведено сравнение различных критериев оценки точности моделей по всей выборке за три года. По всем статистическим показателям

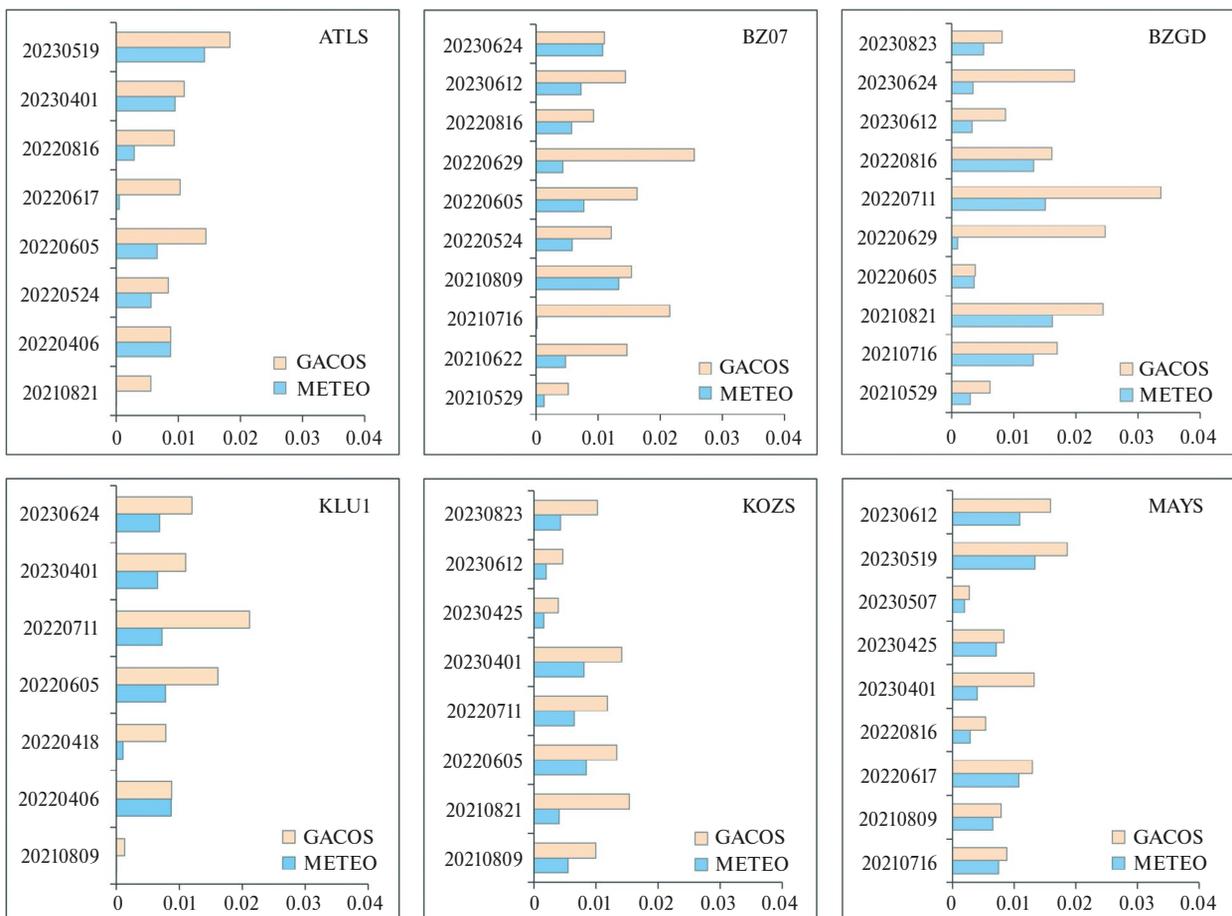


Рис. 5. Сравнение абсолютных невязок (м) для каждой станции ГНСС. Значения невязок отложены по горизонтальной оси. По вертикальной оси – даты измерений на пунктах наблюдений. Голубым цветом показаны результаты по эмпирической модели атмосферы, розовым цветом – по данным GACOS.

видно, что модель GACOS в целом имеет меньшую погрешность и точнее совпадает с задержками по ГНСС. Но в то же время было получено, что примерно четверть результатов (52 из 204) показывают лучшее совпадение с ГНСС именно задержек, рассчитанных по эмпирической модели. Этим фактом нельзя пренебречь.

На рис. 5 показано сравнение абсолютных невязок (м) по каждой станции на дату, на которую эмпирическая модель лучше соответствует задержкам по данным ГНСС, чем модель GACOS. Для этой выборки абсолютные невязки ΔL_{meteo} не превосходят 16 мм, а среднеквадратическая ошибка равна 4 мм, в то время как значения невязок ΔL_{gacos} здесь достигают 34 мм со среднеквадратической ошибкой 6 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Оценка точности двух моделей фазовых зенитных атмосферных задержек проводилась путем анализа среднеквадратической ошибки, относительных и абсолютных невязок и корреляции с эталонными данными, за которые были приняты результаты, рассчитанные в пунктах ГНСС. Результаты показали, что по всем критериям модель GACOS имеет меньшую погрешность и точнее совпадает с данными, полученными по ГНСС в пунктах сопоставления результатов. Относительные невязки задержек ΔL_{meteo} не превышают 5.7%, а для задержек ΔL_{gacos} – 1.6%. При этом средняя относительная невязка для моделей GACOS и эмпирической погодной модели равна 0.3% и 0.9% соответственно, а среднеквадратические ошибки 0.6 см и 2.3 см. Эти величины эквивалентны в абсолютных значениях погрешности в определении зенитной задержки, равной 0.7 см для ΔL_{gacos} и 2 см для ΔL_{meteo} . В целом, в точках расположения пунктов ГНСС, где проводилось сравнение результатов, получена очень высокая точность расчетов (погрешность менее 1%) и очень высокий коэффициент детерминации зависимостей “ $\Delta L_{gnss} - \Delta L_{meteo}$ ” (0.978) и “ $\Delta L_{gnss} - \Delta L_{gacos}$ ” (0.998).

Кроме того, если рассматривать невязки для отдельных станций и на отдельные даты, то для 25% результатов эмпирическая модель превосходит по точности модель GACOS, т.е. величины задержек ближе к задержкам, рассчитанным по измерениям на пунктах ГНСС. Поскольку половина метеостанций и пунктов ГНСС, по которым рассчитывалась эмпирическая погодная модель – это локальные станции Камчатской сети, которые не входят в глобальные сети, полученные результаты дают независимую оценку точности зенитных абсолютных задержек, получаемых с сайта GACOS на территорию полуострова. Результаты

проведенного исследования также показывают, что построенная в работе эмпирическая модель атмосферы обеспечивает хорошую точность расчетов зенитных абсолютных задержек. Даже при относительно невысокой плотности метеостанций и пунктов ГНСС, эти данные необходимо учитывать в развитии методики устранения атмосферных помех из полей смещений, рассчитанных методами интерферометрии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят КФ ФИЦ ЕГС РАН за предоставленные данные станций ГНСС.

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., 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.
- 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. 12–24.
- Baby H.B., Golé P., and Lavergnat J. A model for the tropospheric excess path length of radio waves from surface meteorological measurements // Radio Sci. 1988. 23(6), 1023–1038. DOI: 10.1029/RS023i006p01023.
- Delacourt C., Briole P., Achache J. Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography: application to Etna // Geophysical Research Letters. 1998. V. 25. P. 2849–2852.
- Doin M.-P., Lasserre C., Peltzer G., Cavalié O., & Doubre C. Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models // Journal of Applied Geophysics, 2009. 69(1), 35–50. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2009.03.010.
- Geng J., Chen X., Pan Y., Mao S., Li C., Zhou J., & Zhang K. PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution // GPS Solutions. 2019. 23(4). DOI: 10.1007/s10291-019-0888-1.
- Hanssen R.F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. // Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 2001, 308 p.

- Smith E.K., Weintraub S.* The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies // Proc. I.R.E. 1953. 41, 1035–1037.
- Tetens O.* 1930. Über einige meteorologische Begriffe. Z. Geophys 6: 297–309.
- 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>.

Estimation of the Precision of Atmospheric Phase Delay Models for Displacement Fields on Kamchatka Region Calculated by the Differential Interferometry Method

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*

The paper considers various ways of calculating atmospheric phase delays to correct the interferometric phase from which the displacements of the Earth's surface are calculated by satellite radar interferometry methods. A local empirical weather model based on the empirical dependences of the physical properties of the atmosphere on altitude was constructed using data from Kamchatka meteorological stations, and electromagnetic signal propagation delays were calculated using this model. Further, the precision of the empirical weather model and the GACOS (Generic Atmospheric Corrections Online Service) model was assessed by comparing them with the delays calculated from the network of GNSS sites of the Kamchatka Branch of the Federal Research Center of "United Geophysical Service of RAS" (KB of UGS RAS) in the area of the Kliuchevskoi group of volcanoes. The results showed that for all precision assessment criteria, the GACOS model has lower error and better match with the GNSS data at the result comparison points. The relative residuals of the empirical model delays range from 0 to 5.7%, while for the GACOS delays the relative residuals do not exceed 1.6%. Meanwhile, for the GACOS and empirical weather models, on average, the relative residual is 0.3% and 0.9%, respectively, and the RMS errors are 0.6 cm and 2.3 cm. In general, at points of the locations of GNSS sites, a fairly good precision of calculations was obtained: the error is less than 1%, as well as a very high coefficient of determination of the dependencies of the compared models, almost corresponding to the correlation coefficient equal to 1. In addition, for 25% of the results, it is obtained that the empirical model outperforms the GACOS model, i.e., the delay values are closer to the delays calculated from the measurements at the GNSS sites. Since half of the weather stations and GNSS sites used to calculate the empirical weather model are local stations of the Kamchatka network that are not part of the global networks, the results obtained provide an independent assessment of the precision of corrections from the GACOS online service to the peninsula. The results of the study also show that the empirical atmospheric model constructed in this work provides good precision of calculations at GNSS point locations and their data allow us to calculate atmospheric delays for the Earth surface displacement fields obtained by satellite interferometry methods with high accuracy.

Keywords: satellite interferometry, synthetic aperture radar (SAR), Kamchatka, GACOS, atmospheric delay, weather model

REFERENCES

- Baby H.B., Golé P., and Lavergnat J.* A model for the tropospheric excess path length of radio waves from surface meteorological measurements // Radio Sci. 1988. 23(6), 1023–1038. DOI: 10.1029/RS023i006p01023.
- Delacourt C., Briole P., Achache J.* Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography: application to Etna // Geophysical Research Letters. 1998. V. 25. P. 2849–2852.
- Doin M.-P., Lasserre C., Peltzer G., Cavalié O., & Doubre C.* Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models // Journal of Applied Geophysics. 2009. 69(1), 35–50. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2009.03.010.
- Geng J., Chen X., Pan Y., Mao S., Li C., Zhou J., & Zhang K.* PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution // GPS Solutions, 2019. 23(4). DOI: 10.1007/s10291-019-0888-1.
- Hanssen R.F.* Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. // Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 2001, 308 p.
- Smith E.K., Weintraub S.* The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies // Proc. I.R.E. 1953. 41, 1035–1037.
- Tetens O.* 1930. Über einige meteorologische Begriffe. Z. Geophys 6: 297–309.

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* 21 (2), 9–22 (2024). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-2-9-22>.

Volkova M.S., Mikhailov V.O., Osmanov R.S. Comparison of atmospheric Corrections Models to satellite interferometry Data on Kamchatka Region // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2025. № 3. P. 12–24.

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>.