

Применимость интерферометрических пар на основе состояния местности и среды (на примере Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии)

М. А. Ширяев, Е. А. Балдина

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Москва, 119991, Россия

E-mail: m.shiryayev.w@gmail.com

Оцениваются возможности оптимизации отбора интерферометрических пар на основе анализа условий местности и среды. Исследование проводится на примере выявления потенциальных смещений земной поверхности методом радиолокационной дифференциальной интерферометрии в Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии, которая ранее также изучалась с применением этого метода. Были использованы данные Sentinel-1 за период с 2015 по 2025 г. с восходящего и нисходящего витков, а их обработка проводилась при помощи программных средств на языке Python. Из числа метеопараметров и характеристик состояния местности (источниками были реанализ ERA5 (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ReAnalysis) и продукты на основе данных системы MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)) отобраны те параметры, изменения которых показали лучшую связь с когерентностью. Такие параметры были объединены в интегральный показатель, названный индексом сходства, а его значения показали высокую корреляцию с когерентностью. Интерферометрические пары, отобранные по индексу сходства, в основном имеют высокую когерентность относительно других пар на те же периоды, а результаты интерферометрической обработки после отбора данных по выведенному индексу практически не отличаются от величин смещений, полученных методом малых базовых линий. По результатам обработки данных с восходящего и нисходящего витков также были рассчитаны вертикальные смещения. В рассматриваемый период зафиксирована серия вертикальных поднятий и опусканий, самое значительное поднятие произошло между 2023 и 2024 г. и составило до 3,5 см. Такие результаты говорят о необходимости продолжения мониторинга территории для выявления потенциальных вертикальных движений земной поверхности в будущем.

Ключевые слова: спутниковая дифференциальная интерферометрия, Sentinel-1, полуостров Камчатка, когерентность, вулканические зоны, реанализ

Одобрена к печати: 23.06.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-119-136

Введение

Метод радиолокационной дифференциальной интерферометрии DInSAR (*англ.* Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry) успешно применяется для изучения изменений природных объектов. Однако это не отрицает того факта, что на радиолокационный сигнал влияет множество факторов. Они зачастую снижают качество результата, из-за чего полученные продукты интерферометрической обработки тяжело интерпретировать. Выделяют следующие причины декорреляции сигналов: пространственную (из-за различий положения и ошибок ориентации спутника в моменты съёмки), шумовую (вследствие тепловых шумов приёмного тракта), а также временную (ввиду изменения свойств снимаемой местности и среды) (Hanssen, 2001). Свойства земной поверхности меняются под воздействием изменения влажности поверхности (Zwieback et al., 2015), объёма вегетирующей растительности (Zwieback, Hajnsek, 2016), характеристик снежного покрова (Benedikter et al., 2024), ветра (Lort et al., 2018) и т.д. Помимо порождения декорреляции, среда непрерывно влияет на скорость движения радиоволны. Такое влияние оказывают изменения степени ионизации в ионосфере (Mao et al., 2025), физических параметров тропосферы (Smith, Weintraub, 1953), концентрации водяного пара и аэрозолей (Bredemeyer et al., 2018; Solheim et al., 1999), диэлектрических свойств поверхности (Westerhoff, Steyn-Ross, 2020), а также блокирующих покро-

вов, таких как растительность (Zwieback, Hajnsek, 2016). Подобные континуальные задержки сигнала могут быть частично скомпенсированы поправками (как, например, тропосферные задержки) (Doin et al., 2009; Yu et al., 2018). Однако именно декорреляция часто играет определяющую роль в возможности получения результатов в целом. Ввиду этого для достижения более надёжного результата перед использованием данных необходимо уделять внимание их отбору и оценке особенностей местности и среды в моменты съёмки. Особенно важным это становится при невозможности проводить интерферометрическую обработку методами, применяющими большое число снимков. Это может произойти из-за необходимости использования колоссальных вычислительных мощностей (например, при большом охвате территории) либо затруднений в получении всех возможных данных (в частности, коммерческих).

Тем не менее метод радиолокационной интерферометрии давно зарекомендовал себя в задачах мониторинга природных территорий, в частности вулканических и геотермальных систем (Fernández et al., 2015). Одним из таких объектов на территории России представляется Узон-Гейзерная вулcano-тектоническая депрессия (УГВТД) (рис. 1). Это кальдерный комплекс на востоке Камчатского полуострова, в пределах которого расположена долина реки Гейзерной — одна из крупнейших геотермальных зон мира и уникальный памятник природы. Эта территория вызывает интерес ввиду активности склоновых процессов в последние годы, в частности, из-за схода нескольких крупных оползней, кардинально изменивших облик долины. Считается, что катализатором склоновых процессов служат неглубоко залегающие магматические очаги (Кугаенко и др., 2015; Лебедева и др., 2020). В исследовании (Lundgren, Lu, 2006) на территории УГВТД по снимкам Radarsat-1 рассчитаны изменения высоты поверхности за период с 1999 по 2004 г. В период с 2000 по 2003 г. было зафиксировано поднятие до 15 см на площади $\sim 15 \times 9$ км, которое имело очаг в районе восточного борта депрессии у подножия вулкана Кихпинич. Наличие, а также рассчитанная глубина этого очага согласуется с результатами последующих геофизических исследований (Кугаенко и др., 2015).



Рис. 1. Узон-Гейзерная вулcano-тектоническая депрессия на снимке MSI/Sentinel-2 от 15.09.2024 (а) и её местоположение на полуострове Камчатка (б)

Для изучения вероятных движений поверхности, которые могли произойти за последние годы, проведена серия исследований УГВТД методами дифференциальной интерферометрии по данным Sentinel-1 (Ширшова и др., 2023; Ширяев и др., 2024). В этих работах были использованы данные с противоположных витков, перекрывающих общий интервал с 2017 по 2022 г. Полученные результаты плохо согласуются между собой, что указывает на необходимость исследования по единой методике на одинаковые интервалы. Использование данных с восходящего и нисходящего витков также позволит получить вертикальные смещения.

Материалы и методы

Для исследования были использованы снимки Sentinel-1 как с восходящего, так и с нисходящего витков с той же геометрией, что и в ранних исследованиях (рис. 2) (Ширшова и др., 2023; Ширяев и др., 2024). Время съёмки у снимков с восходящего витка — около 07:00 по Гринвичу, с нисходящего — 19:40 по Гринвичу. Снимки были получены из архива Центра обработки данных (англ. Alaska Satellite Facility) и наземной станции спутникового слежения Геофизического института Университета Аляски (англ. Geophysical Institute of the University of Alaska Fairbanks) (<https://asf.alaska.edu/>). Снимки с обеих сцен взяты за летний период — с 1 июля по 10 октября. Так, с восходящего витка было использовано 85 снимков за период с 2015 по 2025 г., а с нисходящего — 77 за период с 2016 по 2025 г.

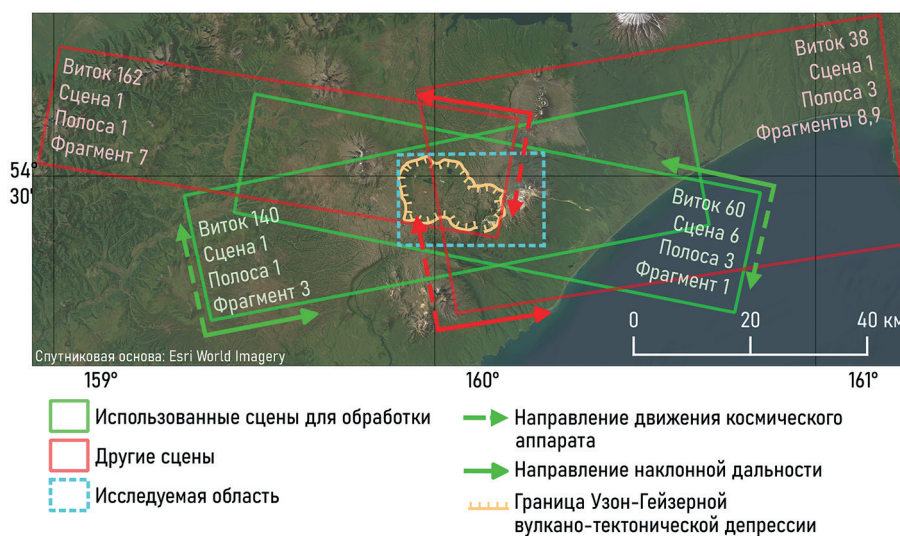


Рис. 2. Геометрия сцен снимков Sentinel-1, покрывающих Узон-Гейзерную вулcano-тектоническую депрессию

Подход подбора интерферометрических пар предполагает прогнозирование значений когерентности пар на основе степени изменения состояния местности и среды в моменты съёмок, не прибегая к непосредственному расчёту когерентности. Так, уже известные факторы, влияющие на когерентность, можно описать величинами, доступными из различных источников данных, а сами данные можно получить оперативно. В научной литературе уже описаны методы прогнозирования когерентности в целях оптимизации отбора данных, однако они либо не учитывают особенностей изменения среды в каждый год (Smittarello et al., 2022), либо основаны лишь на одном параметре состояния местности — NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index) (Wang et al., 2025). Эти алгоритмы можно улучшить, если анализировать состояние местности и среды комплексно (т. е. все параметры в совокупности) и в каждый момент съёмки. Так, лучшая когерентность будет у пар с минимальными различиями в состоянии местности. Для исследования УГВТД методом дифференциальной интерферометрии это особенно важно, поскольку территория характеризуется пересечённым рельефом с большими уклонами, крайне переменчивыми погодными условиями, коротким бесснежным периодом с июля по начало октября, а также наличием растительного покрова. Дополнительно необходимо ограничить базовую линию для снижения влияния ошибок опорной цифровой модели рельефа (под базовой линией здесь и далее подразумевается её перпендикулярная компонента). Для данных Sentinel-1 оптимальным значением базовой линии для дифференциальной интерферометрии считается величина не больше 150 м (Braun, 2021). Однако она может быть ограничена ещё больше, так как на исследуемой территории перепад составляет больше 1400 м, а крутизна склонов — до 40° и выше.

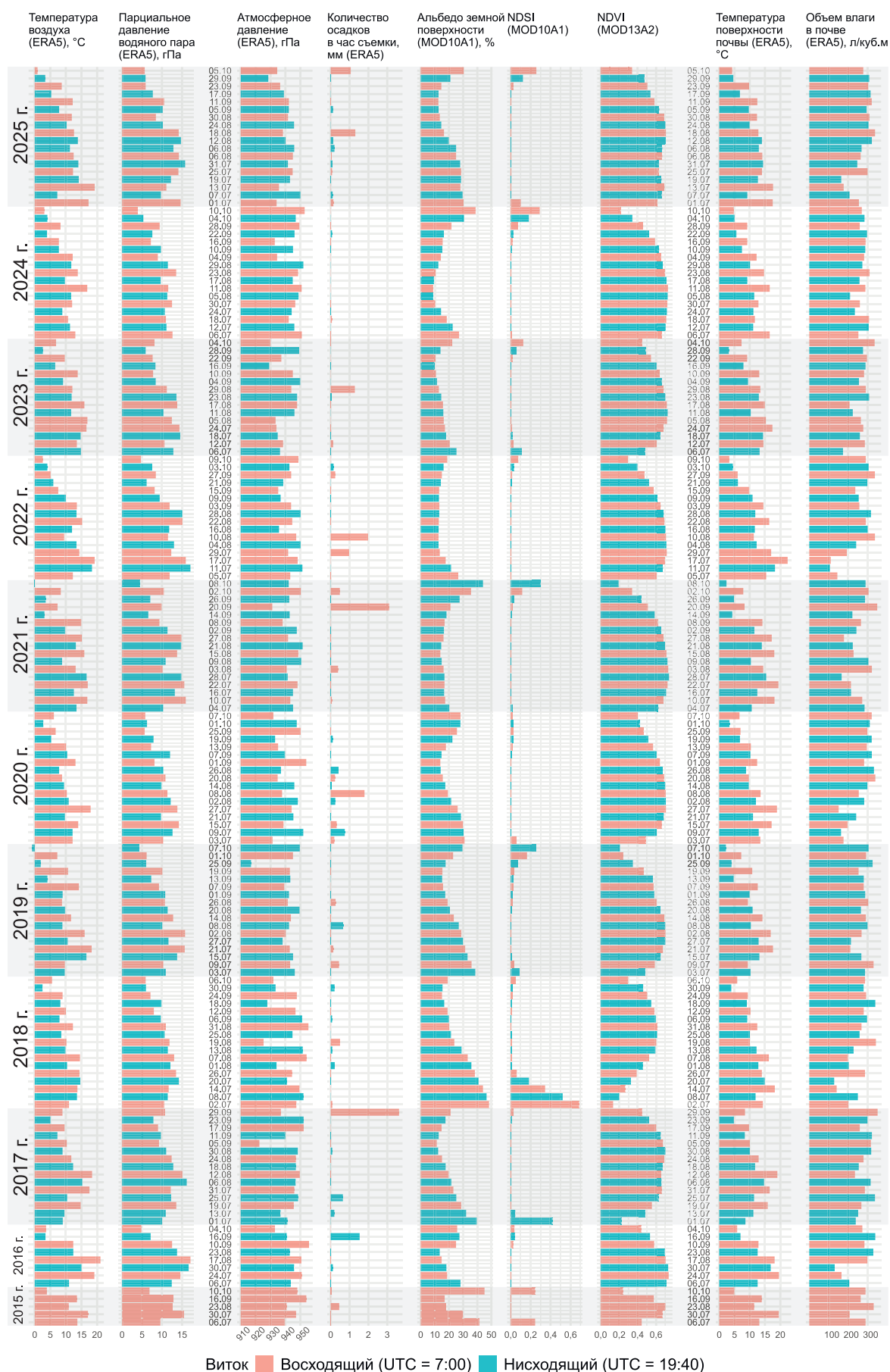


Рис. 3. Параметры состояния местности и среды в моменты съёмки

Для характеристики состояния местности в моменты съёмки были использованы данные реанализа ERA5 (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ReAnalysis) (<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels>). Наземные метеоданные не брались в расчёт, так как ближайшая к УГВТД метеостанция Семячик расположена в 40 км от исследуемой территории на побережье Тихого океана. Значительная удалённость станции, различия по высоте, а также несовпадение времени съёмки и получения метеоданных с учётом сильной погодной изменчивости заметно снижают точность оценки состояния местности по этим данным. Так, для анализа были взяты такие данные ERA5, как температура воздуха на высоте 2 м, точка росы для пересчёта в парциальное давление водяного пара, атмосферное давление в приземном слое, количество осадков, температура почвы и количество влаги в почве. Кроме того, использовались продукты по данным системы MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer): NDVI (продукт MOD13A2) (<https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-mod13a2-061>), NDSI (*англ.* Normalized Difference Snow Index) и альbedo земной поверхности (оба — продукт MOD10A1) (<https://nsidc.org/data/mod10a1/versions/61>). Несмотря на то, что временное разрешение данных MOD13A2 составляет 16 сут, что реже периода повторения съёмок Sentinel-1 (12 сут), набор данных позволяет восстановить особенности изменения значений для каждого года. Привлечение данных съёмочных систем гидрометеорологического назначения обеспечивает высокую оперативность получения информации. Недостающие значения NDVI были проинтерполированы. А чтобы минимизировать влияние выбросов при анализе снежного покрова по данным MOD10A1, имеющих временное разрешение в 1 сут, а также пропусков данных, значения были аппроксимированы скользящим средним. На *рис. 3* приведены значения каждого анализируемого параметра для всех дат съёмки.

Интерферометрическая обработка проводилась с помощью python-библиотеки PyGMTSAR library (*англ.* Python Generic Mapping Tools for Synthetic Aperture Radar) (<https://github.com/AlexeyPechnikov/pygmtsar>), позволяющей проводить облачную обработку методом малых базовых линий, а также дополнительных инструментов: для анализа и отбора данных, атмосферной коррекции — GACOS (*англ.* Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR) (<http://www.gacos.net/>) и для расчёта вертикальных смещений (*рис. 4*).

Из доступных снимков на летний сезон можно сформировать 3017 пар с восходящего витка и 2488 пар с нисходящего (всего 5505 пар) с временной базой от 9 мес. (*рис. 5а*). Для всех пар были рассчитаны средние значения когерентности в границах рассматриваемой территории (см. *рис. 2*). Величины временной и пространственной базы у этих пар сильно варьируются, а поскольку эти параметры существенно влияют на когерентность, их значения должны быть однородными. Это позволит минимизировать их влияние на когерентность, чтобы более чётко отследить воздействие именно природных факторов на неё. Поэтому для анализа были выбраны пары с временной базой около года, так как это наибольшая по объёму выборка, а значения когерентности у таких пар в среднем наиболее высокие. Пары в пределах одного лета не использовались, поскольку когерентность падает с увеличением временной базы экспоненциально, а наибольшая скорость падения соответствует коротким временным интервалам. Применение пар с малыми, но разными временными базами создаст разброс значений когерентности, коррелирующий именно с величиной временной базы и подавляющий влияние среды. А при больших временных базах скорость падения когерентности гораздо ниже (Chaabane et al., 2005). Кроме того, перпендикулярная базовая линия была ограничена величиной 70 м. Таким критериям удовлетворяют 283 пары с восходящего витка и 302 пары с нисходящего (всего 585 пар) (*рис. 5б*). Распределение полученной выборки близко к нормальному, что подтверждается тестами Колмогорова—Смирнова ($p = 0,093$) и Шапиро—Уилка ($p = 1,5 \cdot 10^{-5}$), и её можно анализировать. Повышенное число пар с малыми значениями когерентности объясняется большой долей покрытия снежным покровом в один из моментов съёмок. Средние значения когерентности у всех пар не превышают 0,3, так как на исследуемой территории присутствуют низкокогерентные области: участки переналожения сигнала, с более плотной растительностью и т. д. Перед этапом отбора пар эти области не были исключены из-за технической сложности удаления общих участков для всех

пар. При дальнейшей обработке отобранных пар эти участки были отфильтрованы по порогу когерентности (у разных пар они не совпадают).

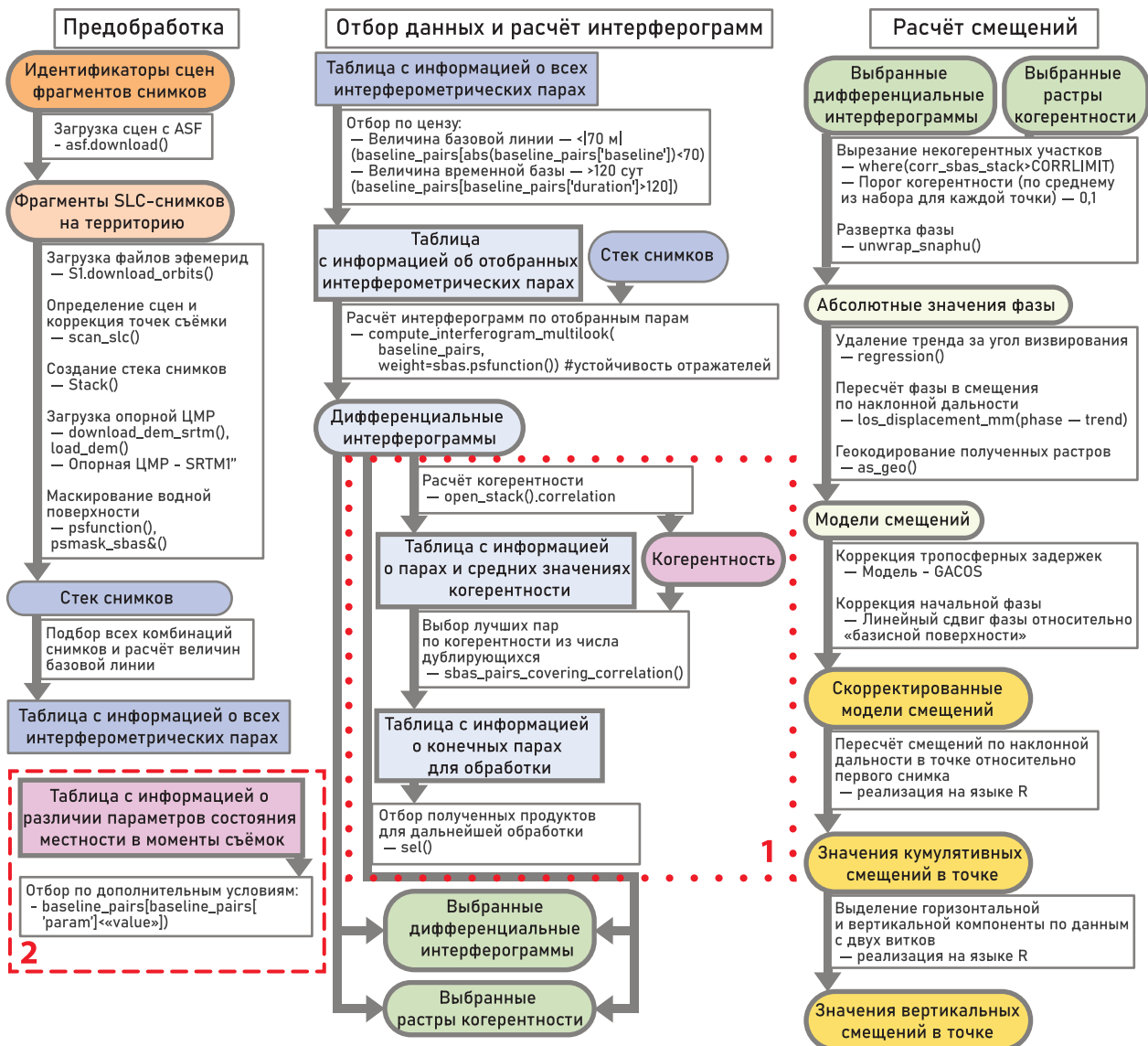


Рис. 4. Последовательность расчёта смещений с использованием библиотеки PyGMTSAR и дополнительных средств. Цветом обозначен этап, в рамках которого применяется продукт (более бледный оттенок определённого цвета — промежуточный продукт). Сиреневым цветом обозначены продукты, использовавшиеся для отбора. Блоки отбора данных № 1 и 2 раскрыты на рис. 8

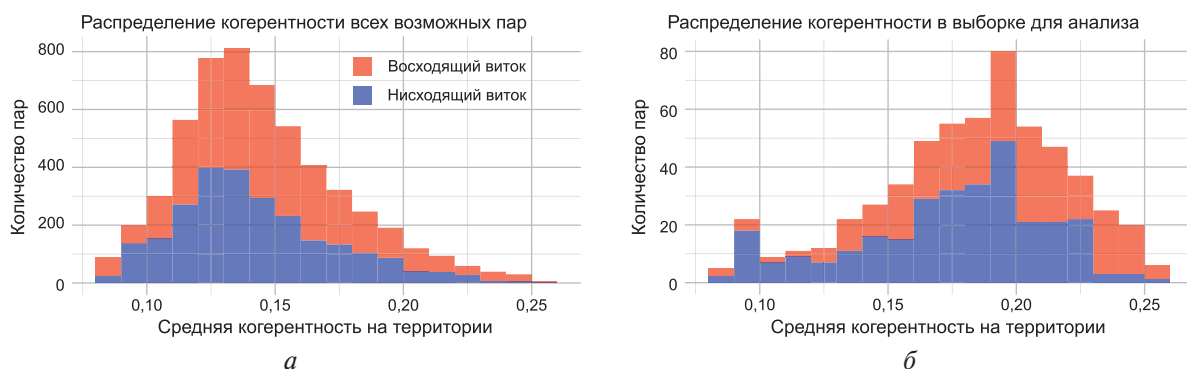


Рис. 5. Распределение когерентности: а — все возможные пары; б — использованная выборка

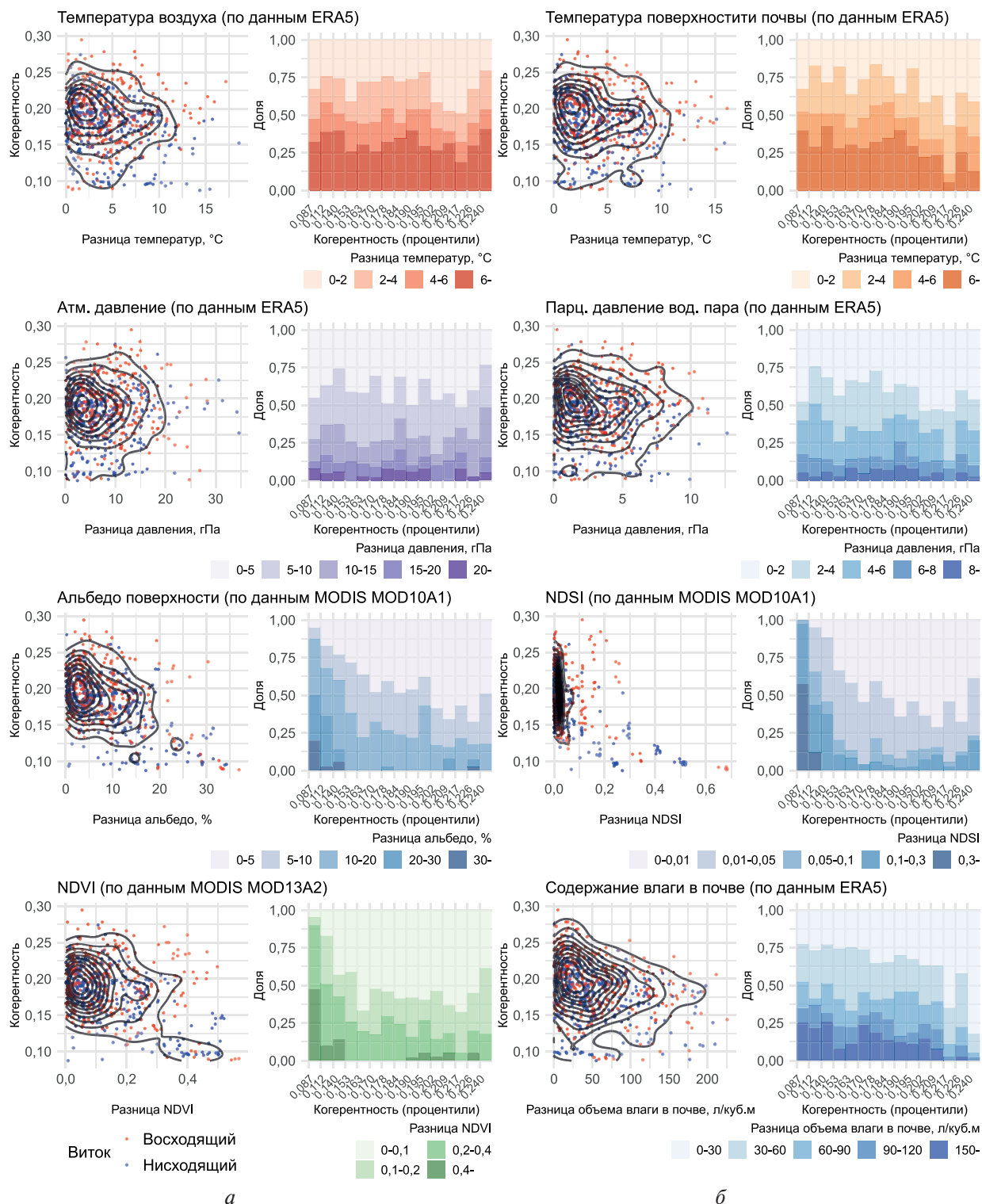


Рис. 6. Связь изменения параметров состояния местности с когерентностью: а — диаграммы рассеяния с распределением изменения параметров и когерентности; б — диаграммы с распределением изменения параметров по равновероятностным классам значений когерентности

Изменения параметров среды для пар снимков (см. рис. 3) сопоставлялись со средними по участку значениями когерентности. Связь с когерентностью показали: изменения площади снежного покрова (через NDSI и альbedo поверхности), объема вегетирующей растительности (через NDVI), содержания влаги в верхнем слое почвы и, менее явно, температуры поверхности (рис. 6). Индекс NDSI в дальнейшем не использовался, поскольку альbedo

лучше описывает покрытие территории снегом, даже несмотря на то, что на рост альбедо также влияет отсутствие растительности. Хотя на диаграммах видно, что с ростом когерентности доля пар с большими различиями параметров снижается, линейной связи на диаграммах рассеяния почти не наблюдается. Это объясняется тем, что на когерентность влияет именно совокупность параметров. В частности, одни значения параметров у пары с низкой когерентностью могут остаться неизменными, а другие — измениться сильно (что и повлияет на когерентность). Поэтому следует ввести интегральную характеристику, позволяющую учитывать эти параметры совместно.

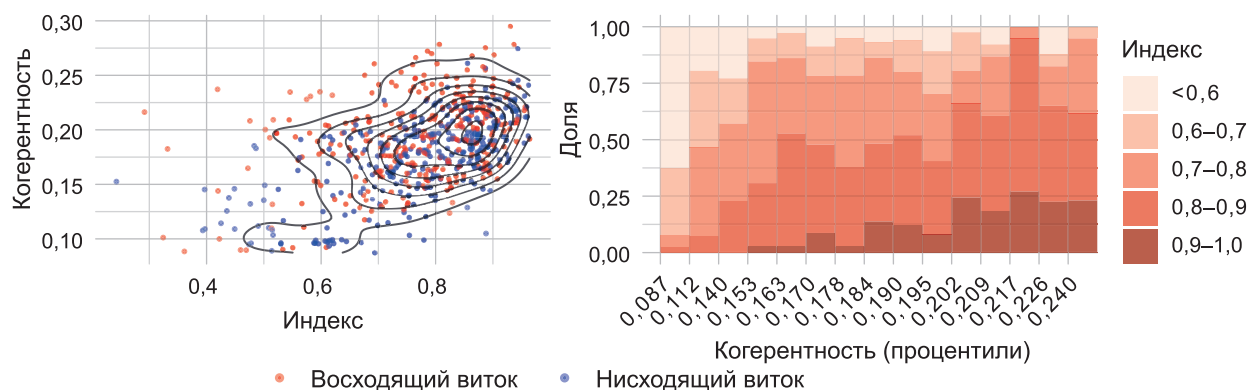


Рис. 7. Связь рассчитанного индекса сходства и когерентности

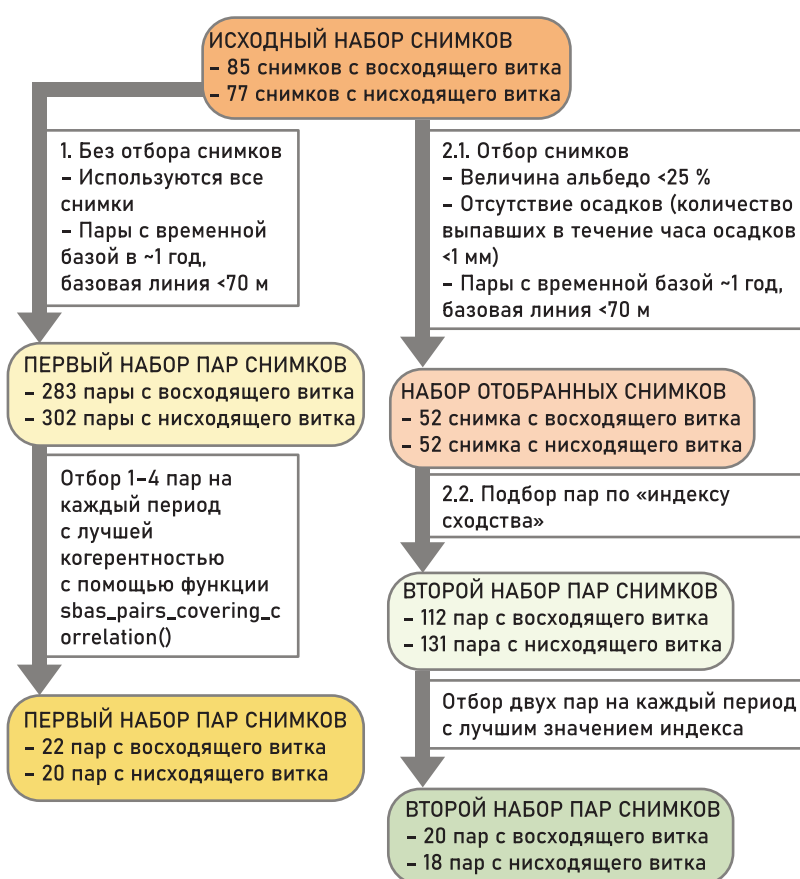


Рис. 8. Порядок формирования наборов интерферометрических пар

Параметры, которые показывают связь с когерентностью, объединены в простой индекс, условно названный индексом сходства (ИС). Он получен следующим образом:

$$ИС = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n M_i / M_{i\max}}{n}, \quad M = \{t_{soil}, d_{soil}, NDVI, A\},$$

где t_{soil} — разница значений температуры почвы у пары снимков; d_{soil} — разница значений влагосодержания почвы; NDVI (зд.) — разница значений индекса NDVI; A — разница значений альбедо поверхности; $M_{i\max}$ — наибольшее значение параметра среди всех пар снимков. Вклад параметров был принят равным. Для удобства значения индекса были преобразованы так, чтобы большие значения соответствовали слабому изменению среды. Значения такого индекса показали линейную связь с когерентностью, а коэффициент корреляции Спирмена составил 0,49 (рис. 7).

Для оценки эффективности отбора данных по состоянию среды была проведена интерферометрическая обработка двух наборов пар, схема отбора представлена на рис. 8. В первый набор, обработка которого проводилась методом малых базовых линий, попали пары с лучшими значениями когерентности, во второй — с лучшими значениями ИС. Оба набора включали пары с базовой линией не более 70 м и временной базой в один год. Граница по количеству осадков была выбрана равной 1 мм посредством сопоставления количества осадков в окрестности метеостанции Семячик по реанализу с записями о характере осадков с самой метеостанции, а граница величины альбедо, составившая 25 %, соответствует доле покрытия территории снегом примерно в 10 %.

Результаты отбора данных

В первом наборе присутствуют по 1–4 пары на каждый год с каждого витка и по 2 — во втором наборе. Стоит отметить, что некоторые пары, попавшие во второй набор, оказались и в первом, где пары имеют наилучшие значения когерентности (рис. 9). Это уже свидетельствует о хорошем качестве отбора по параметрам состояния среды.

Для оценки качества пар, отобранных по ИС, когерентность этих пар была сопоставлена с когерентностью других пар на аналогичные периоды. На графиках (рис. 10) все интерферометрические пары проранжированы по их значению когерентности. Отобранные по ИС пары, обозначенные зелёным цветом, преимущественно имеют высокие значения, а некоторые пары и вовсе лучшие среди пар за свой период. Когерентность выбранных по ИС пар в среднем выше, чем у 81 % остальных возможных комбинаций снимков при отсеивании пар с большими базовыми линиями. Если же сравнивать со всеми парами с любыми величинами базовой линии, то когерентность равна 85 %. Такой результат говорит о хорошем качестве отбора по данной методике.

Результаты интерферометрической обработки

По парам из обоих наборов были получены растровые модели смещений (рис. 11). Из всего рассматриваемого периода выделяется интервал с 2023 по 2024 г. В этот период на всех картах смещений с обоих витков выделяется поднятие до 3 см в проекции наклонной дальности LOS (англ. line of sight).

Дальнейший анализ проводился для окрестности эпицентра выявленного поднятия (рис. 12). Из моделей смещений были установлены осреднённые значения смещений в окрестности от точки интереса в пределах 100 м (см. рис. 12а). По этим значениям рассчитаны кумулятивные смещения на каждый год, что позволило получить их временной ход (см. рис. 12б). Видно, что на графиках основные тренды временного хода по двум наборам в целом совпадают. Расхождения в значениях могут объясняться выбросами на отдельных моделях смещений. Они могут быть связаны с неустранёнными ошибками либо выбросами отдельных пикселей.

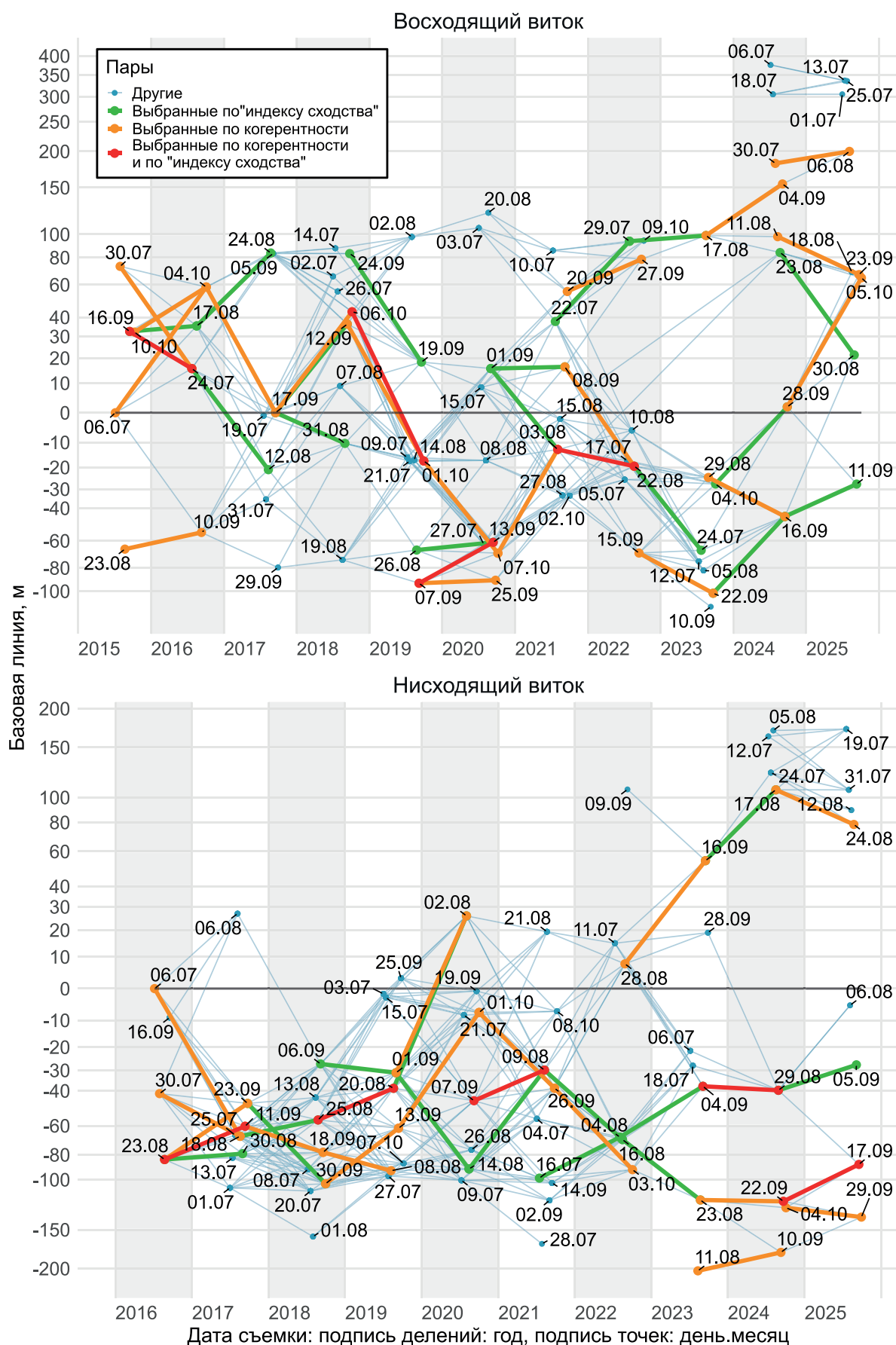


Рис. 9. Распределение обработанных интерферометрических пар по наборам и величине их базовой линии

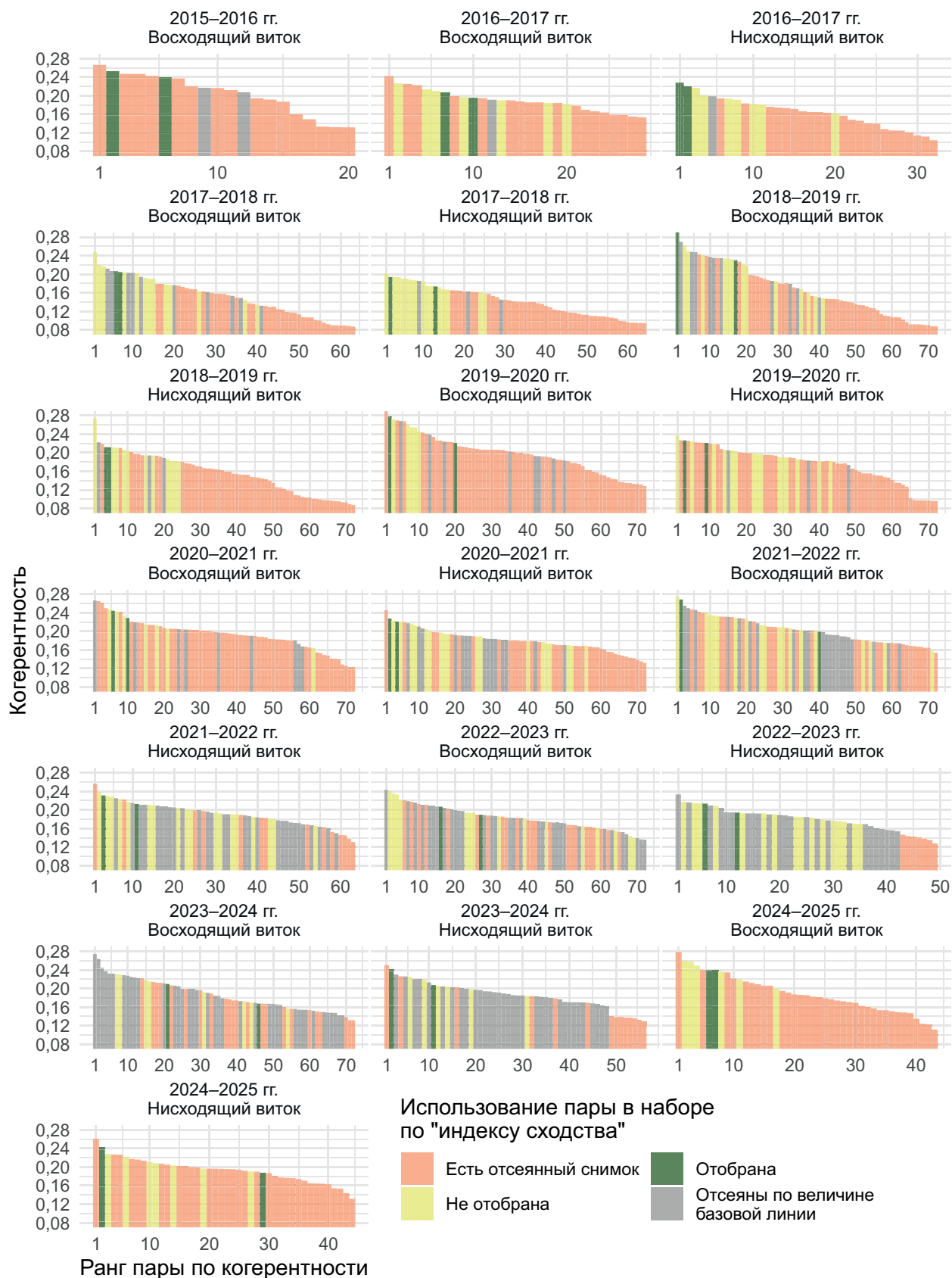


Рис. 10. Сопоставление значений когерентности пар, отобранных по индексу сходства, со значениями других пар на аналогичные периоды и с аналогичной геометрией

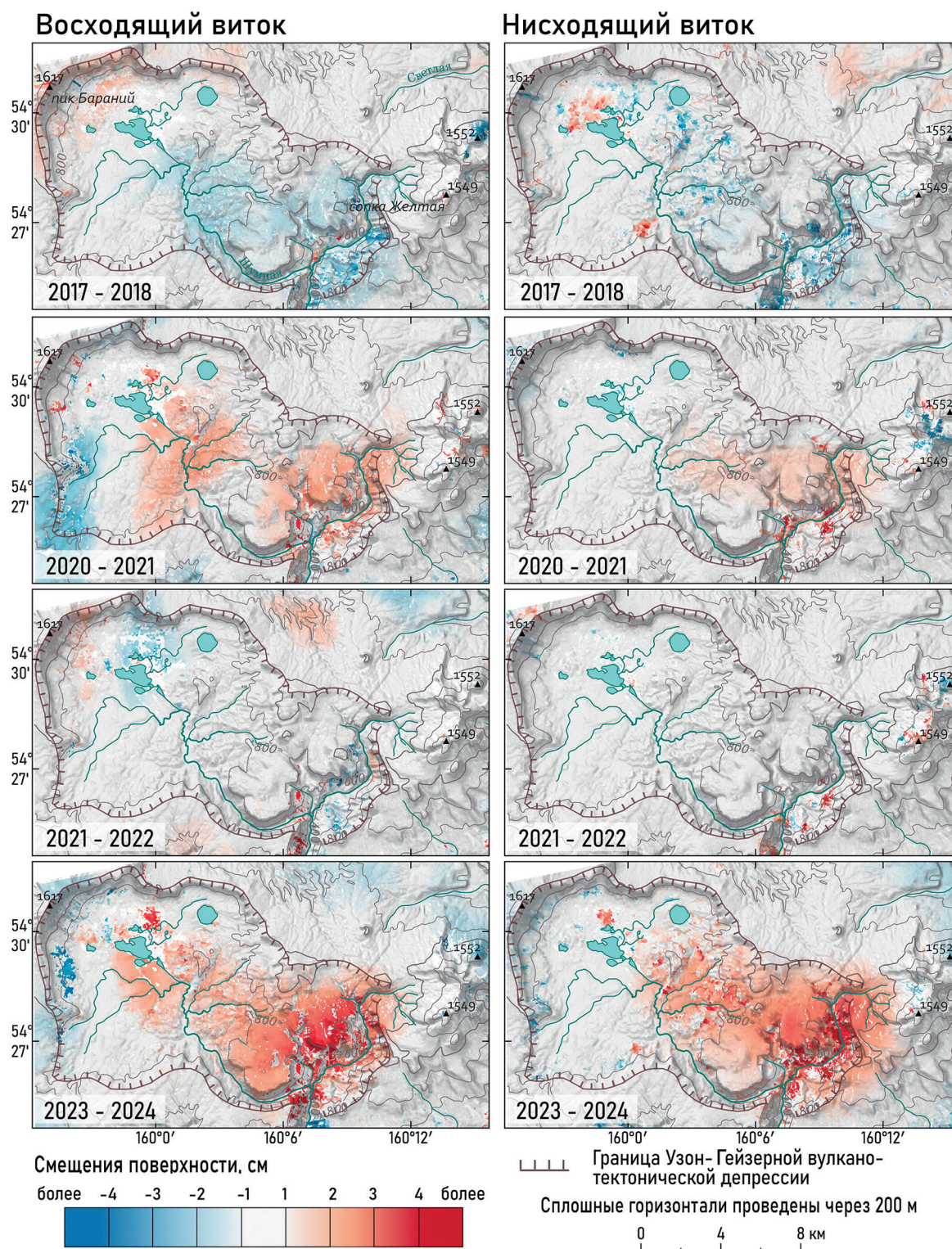


Рис. 11. Примеры полученных моделей смещений

По моделям смещений с двух витков были рассчитаны вертикальные смещения (см. рис. 12в), которые позволили лучше восстановить динамику изменения высоты поверхности. Так, поднятию 2023–2024 гг., достигшему 3,5 см, предшествовала серия опусканий и поднятий. В частности, поднятие 2020–2021 гг. было зафиксировано и в прошлом исследовании (Ширяев и др., 2024). Расхождение в значениях по двум наборам не превышает 0,8 см при максимальной амплитуде в 5,5 см.

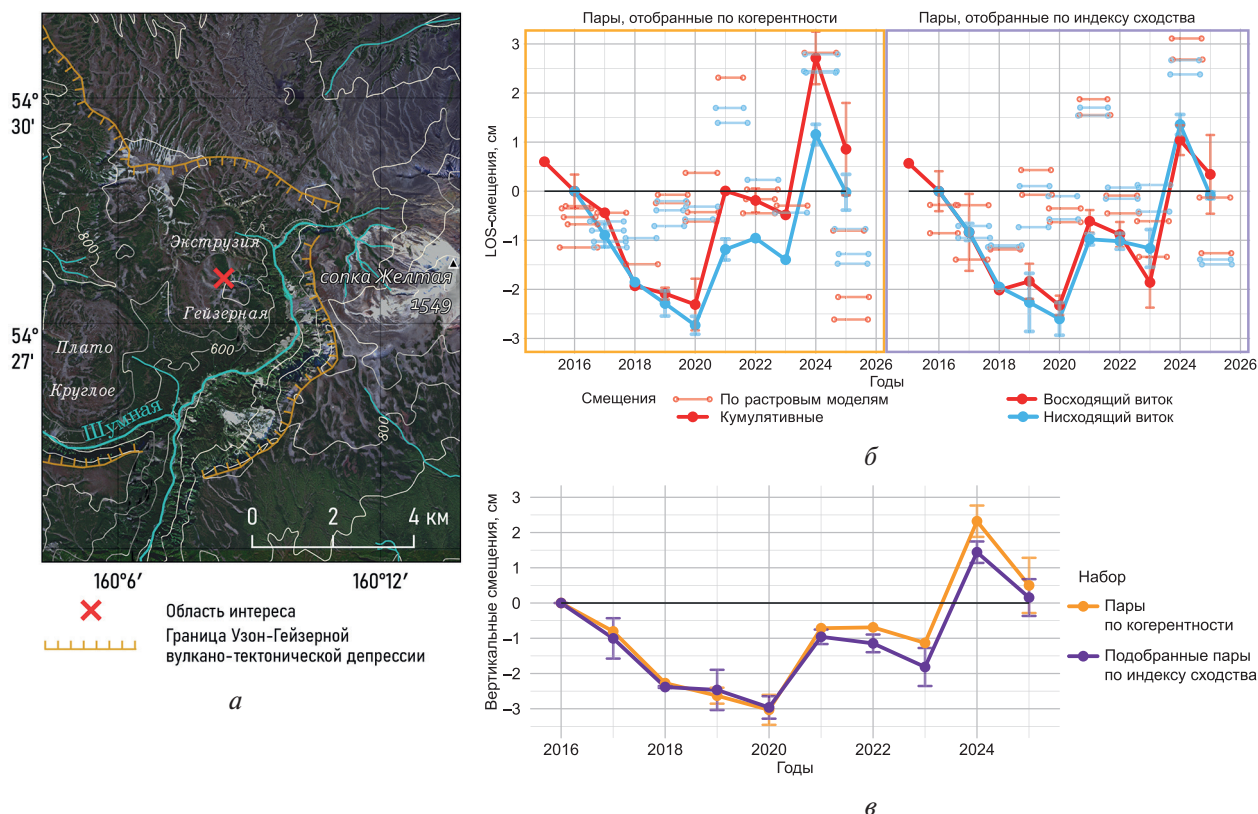


Рис. 12. Выбранный для анализа участок в Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии (а), полученные на нём значения смещений с двух витков (б) и рассчитанные вертикальные смещения (в)

Обсуждение

Эпицентр поднятия 2023–2024 гг. расположен в восточной части УГВТД вблизи поднятия 2000–2003 гг., что может свидетельствовать о его возможной связи с тем же магматическим очагом. Однако на интерферограммах с восходящего витка эпицентр проявляется на экструзии Гейзерной, а с нисходящего — смещён на 3 км восточнее к подножью сопки Жёлтой — одному из конусов вулкана Кихпиныч. Тем не менее поднятие очень чётко выделяется на всех интерферограммах, а величина везде соответствует примерно полутора интерферометрическим полосам (рис. 13). Сама область поднятия слабозашумлённая, а для расчёта интерферограмм использовались разные комбинации основных и вспомогательных снимков. Это практически исключает влияние внешнего фактора на найденные величины, такого как нескорректированные тропосферные задержки.

Стоит также отметить, что на полученных моделях смещений отсутствуют «просадки» в северо-восточной части депрессии в периоды с 2019 по 2023 г., проявившиеся в более раннем исследовании (Ширяев и др., 2024). Эти псевдосмещения в областях с высокой зашумлённостью интерферограмм являются артефактами ошибок развёртки алгоритмом статистических сетей. Ложная интерпретация стала следствием использования данных только с одного витка. Кроме того, в прошлой работе значения когерентности отобранных пар были рассчитаны некорректно из-за выбранного малого размера окна.

Периоды на моделях смещений 2024–2025 гг., на которых проявилось опускание на 1,5–2 см, захватывают момент извержения вулкана Крашенинникова 3 августа 2025 г., находящегося в 20 км к северо-востоку от эпицентра поднятия. Однако ни в один набор не попали пары со снимками 2025 г. до извержения и этот год требует более детального изучения. Вместе с тем, полученный результат из серии согласованных результатов с двух витков говорит о высокой динамичности территории в настоящее время.

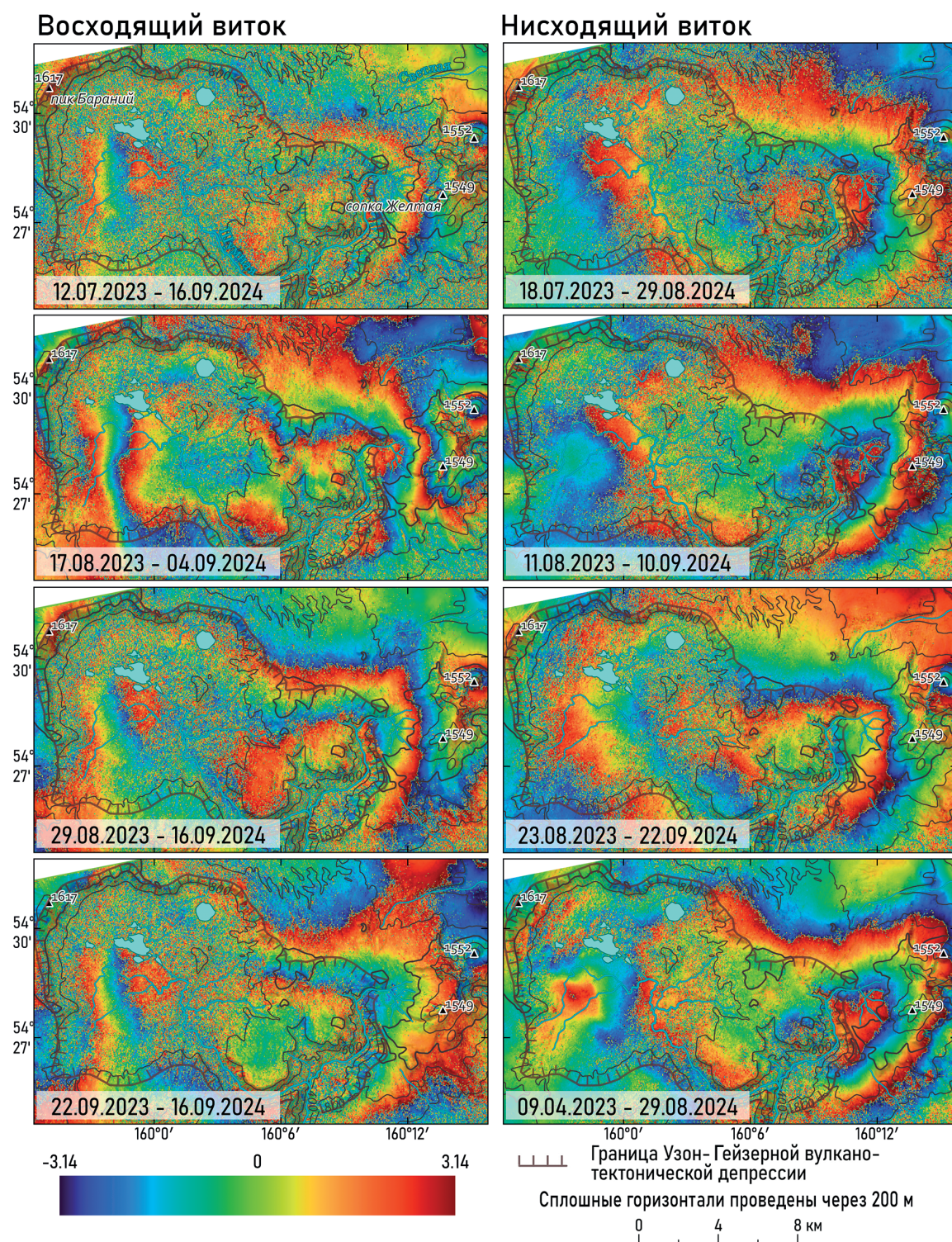


Рис. 13. Интерферограммы за 2023–2024 гг., полученные с обоих витков (без маскирования некогерентных областей и коррекции тропосферных задержек)

Предложенный индекс сходства пока не учитывает неравный вклад разных параметров. Кроме того, степень их влияния будет сильно зависеть от характера территории, что становится предметом дальнейших исследований. Несмотря на это, такая быстрая по производительности методика позволила достаточно точно спрогнозировать качество интерферометрических пар без расчёта когерентности, а факт сходства смещений по данным из двух наборов говорит о потенциале её совершенствования и применения как альтернативной методики.

Заключение

В работе предложена методика подбора качественных интерферометрических пар на основе анализа состояния среды и её изменения без применения алгоритмов на базе попарного анализа когерентности. Эта методика может быть полезна при исследовании обширной территории и необходимости значительных вычислительных мощностей, а также при использовании типов и форматов данных, которые невозможно обработать методами автоматизированной серийной обработки с помощью доступных программных средств. Методика была успешно применена на примере задачи выявления смещений в Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии.

Анализ параметров состояния местности и среды позволил с высокой точностью спрогнозировать значения когерентности интерферометрических пар. Использование предложенного индекса сходства следует считать одним из способов оценки когерентности пар без её расчёта. Однако, в отличие от других методов, этот индекс основан на анализе совокупности параметров местности и среды в моменты съёмки. Таким образом, подбор пригодных интерферометрических пар для получения качественных результатов, моделей смещений, возможен посредством анализа изменения характеристик местности, которые можно взять из открытых источников.

Несмотря на сложные физико-географические особенности территории, сравнение результатов, найденных по сформированной методике, с теми, что были получены традиционными методами, показало её эффективность. Важным итогом стало выявление серии вертикальных разнонаправленных движений, в том числе поднятия величиной до 3,5 см, произошедшего в период с 2023 по 2024 г. Все движения с высокой вероятностью обусловлены деятельностью магматического очага, вызвавшего аналогичные поднятия 20 годами ранее. Исследование, кроме того, позволило актуализировать знания и устранить недостатки предыдущих работ. Полученный результат указывает на необходимость продолжения мониторинга территории методом радиолокационной интерферометрии на предмет потенциальных будущих смещений.

Работа выполнена в рамках госзадания географического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова «Цифровые технологии и методы картографии, геоинформатики и дистанционного зондирования в географических исследованиях».

Литература

1. Кугаенко Ю. А., Салтыков В. А., Горбатилов А. В., Степанова М. Ю. Развитие модели района Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии и вулкана Кихпинич (Камчатка) по результатам совместного анализа данных микросейсмического зондирования и локальной геодинамической активности // *Физика Земли*. 2015. № 3. С. 89–101. DOI: 10.7868/S0002333715030096.
2. Лебедева Е. В., Сугробов В. М., Чижова В. П., Завадская А. В. Долина р. Гейзерной (Камчатка): гидротермальная деятельность и особенности рельефообразования // *Геоморфология*. 2020. № 2. С. 60–73. DOI: 10.31857/S0435428120020066.
3. Ширшова В. Ю., Балдина Е. А., Лебедева Е. В. Опыт применения метода дифференциальной интерферометрии для определения смещений земной поверхности в Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии по данным Sentinel-1A за 2017–2022 годы // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 4. С. 133–146. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-133-146.
4. Ширяев М. А., Балдина Е. А., Лурье И. К. Использование интерферометрических данных со спутника Sentinel-1A для выявления изменений высоты поверхности Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка*. 2024. Т. 68. № 3. С. 42–56. DOI: 10.30533/GiA-2024-022.
5. Benedikter A., Belinska K., Rodriguez-Cassola M. et al. Toward dry snow parameter estimation by simultaneous multiple squint differential InSAR // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2024. V. 62. Article 4303515. 15 p. DOI: 10.1109/TGRS.2024.3486328.

6. *Braun A.* Retrieval of digital elevation models from Sentinel-1 radar data — open applications, techniques, and limitations // *Open Geosciences*. 2021. V. 13. No. 1. P. 532–569. DOI: 10.1515/geo-2020-0246.
7. *Bredemeyer S., Ulmer F.-G., Hansteen T. H., Walter T. R.* Radar path delay effects in volcanic gas plumes: The case of Lascar Volcano, Northern Chile // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. No. 10. Article 1514. 44 p. DOI: 10.3390/rs10101514.
8. *Chaabane F., Tupin F., Maître H.* An empirical model for interferometric coherence // *Proc. SPIE. SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques VII*. 2005. V. 5980. P. 132–140. DOI: 10.1117/12.627341.
9. *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.
10. *Fernández J., González P. J., Camacho A. G. et al.* An overview of geodetic volcano research in the Canary Islands // *Pure and Applied Geophysics*. 2015. V. 172. No. 11. P. 3189–3228. DOI: 10.1007/s00024-014-0916-6.
11. *Hanssen R. F.* Radar interferometry: Data interpretation and error analysis. Kluwer, 2001. 318 p.
12. *Lort M., Aguasca A., López-Martínez C., Fabregas X.* Impact of wind-induced scatterers motion on GB-SAR imaging // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2018. V. 11. No. 10. P. 3757–3768. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2863369.
13. *Lundgren P., Lu Z.* Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations // *Geophysical Research Letters*. 2006. V. 33. No. 6. Article L06301. 4 p. DOI: 10.1029/2005GL025181.
14. *Mao W., Ma P., Zheng Y. et al.* Ionospheric error correction methods for InSAR measurements: A systematic review // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2025. V. 13. No. 4. P. 142–173. DOI: 10.1109/MGRS.2025.3562206.
15. *Smith E., Weintraub S.* The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies // *Proc. IRE*. 1953. V. 41. No. 8. P. 1035–1037. DOI: 10.1109/JRPROC.1953.274297.
16. *Smittarello D., d'Oreye N., Jaspard M. et al.* Pair selection optimization for InSAR time series processing // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 2022. V. 127. No. 3. Article e2021JB022825. 24 p. DOI: 10.1029/2021JB022825.
17. *Solheim F. S., Vivekanandan J., Ware R. H., Rocken C.* Propagation delays induced in GPS signals by dry air, water vapor, hydrometeors, and other particulates // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 1999. V. 104. No. D8. P. 9663–9670. DOI: 10.1029/1999JD900095.
18. *Wang X., Du Q., Luo Y. et al.* Optimized SAR interferogram selection by modeling SAR coherence with the combined analysis of NDVI and spatiotemporal baseline // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2025. V. 22. Article 4003205. 5 p. DOI: 10.1109/LGRS.2025.3528759.
19. *Westerhoff R., Steyn-Ross M.* Explanation of InSAR phase disturbances by seasonal characteristics of soil and vegetation // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 18. Article 3029. 12 p. DOI: 10.3390/rs12183029.
20. *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. No. 10. P. 9202–9222. DOI: 10.1029/2017JB015305.
21. *Zwieback S., Hajnsek I.* Influence of vegetation growth on the polarimetric zero-baseline DInSAR phase diversity — implications for deformation studies // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2016. V. 54. P. 3070–3082. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2511118.
22. *Zwieback S., Hensley S., Hajnsek I.* Assessment of soil moisture effects on L-band radar interferometry // *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 164. P. 77–89. DOI: 10.1016/j.rse.2015.04.012.

Applicability of interferometric pairs based on the state of the surface and weather conditions: a case study of Uzon-Geyser volcanic-tectonic depression

M. A. Shiryaev, E. A. Baldina

Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia,
E-mail: m.shiryaev.w@gmail.com

We evaluated the potential for optimizing the selection of interferometric pairs based on the surface and weather conditions. The study focuses on the example of identifying potential displacements of the Earth's surface using differential radar interferometry method (DInSAR) in the Uzon-Geyser volcanic-tectonic depression. Previously, this territory had also been studied using this method. We used Sentinel-1 data from ascending and descending orbits between 2015 and 2025. Processing was carried out using the software tools in Python. Next, we analyzed the impact of surface conditions on coherence using specific quantities. For this purpose, we used ERA5 reanalysis data and MODIS-based products. We selected parameters whose changes demonstrated the strongest relation with coherence. Then we combined these parameters into an integral index which was called the similarity index. The values of this index demonstrated a high correlation with coherence. Interferometric pairs selected by the values of the similarity index generally had high coherence relative to other pairs for the same periods. The results of DInSAR processing using data selection by the similarity index and by the Small Baseline Subset method were almost identical. We also calculated vertical displacements on the basis of the results of data processing from ascending and descending orbits. A series of vertical uplifts and subsidences were detected during the study period. The most significant uplift, amounting to 3.5 cm, occurred between 2023 and 2024. These results highlight the importance of continued monitoring of this area in the future.

Keywords: differential radar interferometry, DInSAR, Sentinel-1, Kamchatka Peninsula, coherence, volcanic zones, reanalysis

Accepted: 23.06.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-119-136

References

1. Kugaenko Yu. A., Saltykov V. A., Gorbatikov A. V., Stepanova M. Yu., The model of the Uzon-Geizernaya volcano-tectonic depression and Kikhpinych volcano, Kamchatka, from the joint analysis of microseismic sounding data and local geodynamic activity, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2015, V. 51, pp. 403–418, DOI: 10.1134/S106935131503009X.
2. Lebedeva E. V., Sugrobov V. M., Chizhova V. P., Zavadskaya A. V., The valley of the river Geyzernaya (Kamchatka): Hydrothermal activity and features of relief forming, *Geomorfologiya*, 2020, No. 2, pp. 60–73 (in Russian), DOI: 10.31857/S0435428120020066.
3. Shirshova V. Yu., Baldina E. A., Lebedeva E. V., Experiment to determine the dynamics of Earth surface displacements in the Uzon-Geyser volcano-tectonic depression using Sentinel-1A differential interferometry data for 2017–2022, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 4, pp. 133–146 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-133-146.
4. Shiryaev M. A., Baldina E. A., Lurie I. K., Use of the Sentinel-1A satellite DInSAR data to detect changes in the surface elevation of the Uzon-Geyser volcano-tectonic depression, *Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*, 2024, V. 68, No. 3, pp. 42–56 (in Russian), DOI: 10.30533/GiA-2024-022.
5. Benedikter A., Belinska K., Rodriguez-Cassola M. et al., Toward dry snow parameter estimation by simultaneous multiple squint differential InSAR, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2024, V. 62, Article 4303515, 15 p., DOI: 10.1109/TGRS.2024.3486328.
6. Braun A., Retrieval of digital elevation models from Sentinel-1 radar data — open applications, techniques, and limitations, *Open Geosciences*, 2021, V. 13, No. 1, pp. 532–569, DOI: 10.1515/geo-2020-0246.
7. Bredemeyer S., Ulmer F.-G., Hansteen T. H., Walter T. R., Radar path delay effects in volcanic gas plumes: The case of Láscar Volcano, Northern Chile, *Remote Sensing*, 2018, V. 10, No. 10, Article 1514, 44 p., DOI: 10.3390/rs10101514.

8. Chaabane F., Tupin F., Maître H., An empirical model for interferometric coherence, *Proc. SPIE. SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques VII*, 2005, V. 5980, pp. 132–140, DOI: 10.1117/12.627341.
9. 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, pp. 35–50, DOI: 10.1016/j.jappgeo.2009.03.010.
10. Fernández J., González P.J., Camacho A.G. et al., An overview of geodetic volcano research in the Canary Islands, *Pure and Applied Geophysics*, 2015, V. 172, No. 11, pp. 3189–3228, DOI: 10.1007/s00024-014-0916-6.
11. Hanssen R. F., *Radar interferometry: Data interpretation and error analysis*, Kluwer, 2001, 318 p.
12. Lort M., Aguasca A., López-Martínez C., Fabregas X., Impact of wind-induced scatterers motion on GB-SAR imaging, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, V. 11, No. 10, pp. 3757–3768, DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2863369.
13. Lundgren P., Lu Z., Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations, *Geophysical Research Letters*, 2006, V. 33, No. 6, Article L06301, 4 p., DOI: 10.1029/2005GL025181.
14. Mao W., Ma P., Zheng Y. et al., Ionospheric error correction methods for InSAR measurements: A systematic review, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2025, V. 13, No. 4, pp. 142–173, DOI: 10.1109/MGRS.2025.3562206.
15. Smith E., Weintraub S., The Constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies, *Proc. IRE*, 1953, V. 41, No. 8, pp. 1035–1037, DOI: 10.1109/JRPROC.1953.274297.
16. Smittarello D., d'Oreye N., Jaspard M. et al., Pair selection optimization for InSAR time series processing, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, V. 127, No. 3, Article e2021JB022825, 24 p., DOI: 10.1029/2021JB022825.
17. Solheim F. S., Vivekanandan J., Ware R. H., Rocken C., Propagation delays induced in GPS signals by dry air, water vapor, hydrometeors, and other particulates, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, V. 104, No. D8, pp. 9663–9670, DOI: 10.1029/1999JD900095.
18. Wang X., Du Q., Luo Y. et al., Optimized SAR interferogram selection by modeling SAR coherence with the combined analysis of NDVI and spatiotemporal baseline, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2025, V. 22, Article 4003205, 5 p., DOI: 10.1109/LGRS.2025.3528759.
19. Westerhoff R., Steyn-Ross M., Explanation of InSAR phase disturbances by seasonal characteristics of soil and vegetation, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 18, Article 3029, 12 p., DOI: 10.3390/rs12183029.
20. 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, No. 10, pp. 9202–9222, DOI: 10.1029/2017JB015305.
21. Zwieback S., Hajnsek I., Influence of vegetation growth on the polarimetric zero-baseline DInSAR phase diversity — implications for deformation studies, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2016, V. 54, pp. 3070–3082, DOI: 10.1109/TGRS.2015.2511118.
22. Zwieback S., Hensley S., Hajnsek I., Assessment of soil moisture effects on L-band radar interferometry, *Remote Sensing of Environment*, 2015, V. 164, pp. 77–89, DOI: 10.1016/j.rse.2015.04.012.