



Применение данных Sentinel-1 для выявления вертикальных смещений в районе Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии за 2015-2024 годы

Ширяев М.А. (1,2), к.г.н. Балдина Е.А. (1)

(1) МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики

(2) НЦ оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы»

Цели и задачи

Цели исследования:

- Выявление потенциальных смещений земной поверхности в Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии методом дифференциальной интерферометрии;
- Оценка возможности отбора радиолокационных данных по параметрам состояния среды с целью повышения качества интерферометрической обработки без непосредственной работы с самими данными

Задачи исследования:

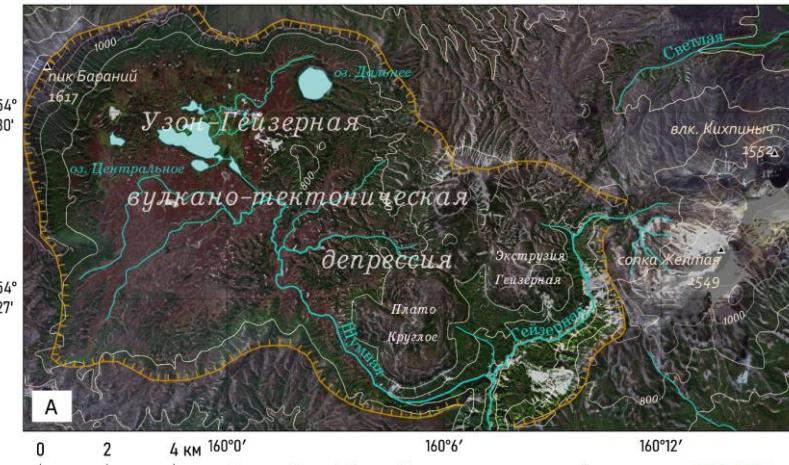
- Выбор показателей на основе влияющих на качество интерферометрической обработки параметров о состоянии местности в моменты съемки и источников данных;
- Реализация сформированной методики отбора радиолокационных снимков и подбора интерферометрических пар на исследуемую территорию, а также их интерферометрическая обработка;
- Анализ полученных смещений и оценка качества отбора данных.



Территория исследования

Узон-Гейзерная вулкано-тектоническая депрессия

- Кальдерный комплекс на востоке Камчатского полуострова
- Размеры 18x12 км
- Перепад высот - 600-1600 м
- Сформировалась в верхнем плейстоцене (примерно 80-40 тыс. лет назад)
- Климат умеренный муссонный с большим количеством осадков летом
- Растительность - травянистая со стланиковыми зарослями
- Одна из крупнейших геотермальных зон мира, часть объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО «Вулканы Камчатки».



Узон-Гейзерная вулкано-тектоническая депрессия на снимке MSI/Sentinel-2 от 16.09.2021

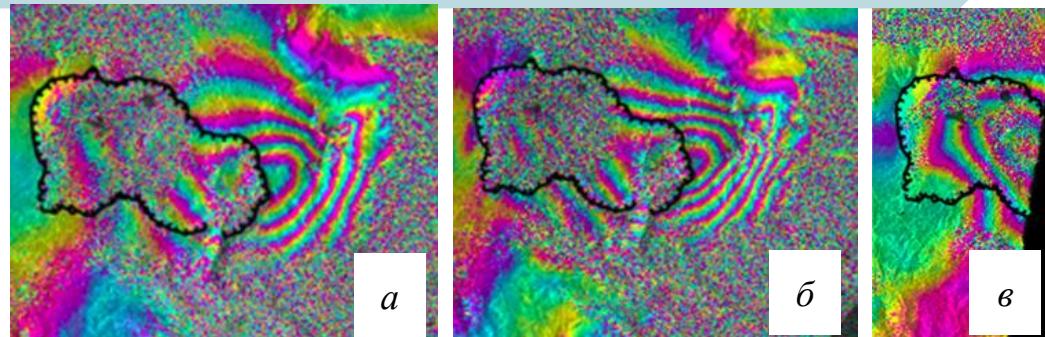
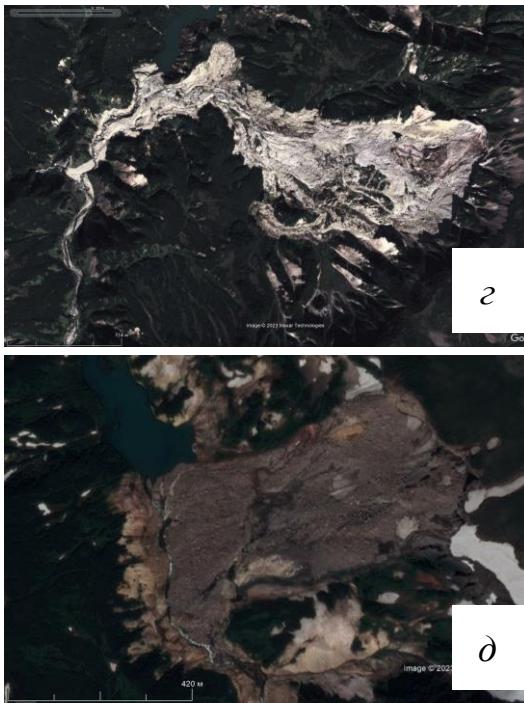


Западная часть Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии. Фото из открытых источников

Опыт выявления смещения на исследуемой территории [Lundgren, Lu, 2006], актуальность

Выявленные смещения:

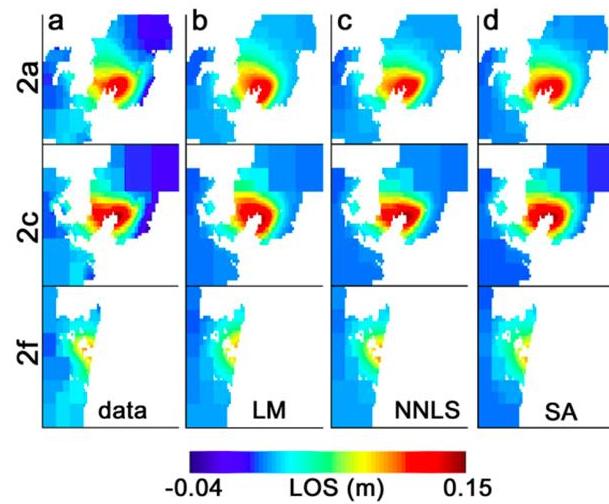
- Поднятия до 15 см за период с 2000 по 2003 гг.
- Площадь поднятия - 15.4×8.7 км
- Одна из вероятных причин активизации склоновых процессов



Полученные интерферограммы по парам снимков RADARSAT-1 23.08.2000-23.08.2003 (а), 19.09.2000-11.08.2003 (б) и 02.09.2000-18.08.2003 (в) [Lundgren, Lu, 2006]



Последствия схода оползней в 2007 (г) и в 2014 (д) годах



Рассчитанные смещения [Lundgren, Lu, 2006]

Опыт выявления смещения на исследуемой территории [Ширшова и др., 2023; Ширяев и др., 2024], актуальность

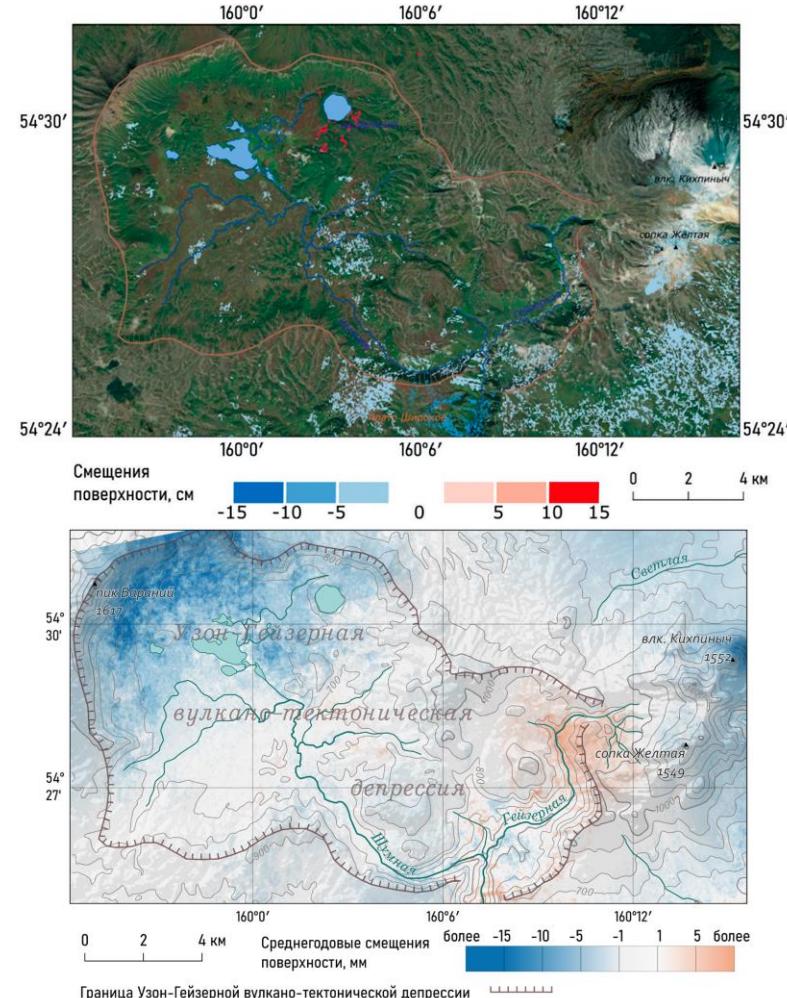
Ширшова и др., 2023:

- Использованы снимки Sentinel-1 с нисходящего узла за период с 2017 по 2022
- Представлены результаты только по одной паре снимков, вертикальные смещения от -15 см до +7 см

Ширяев и др., 2024:

- Использованы снимки Sentinel-1 с восходящего узла за период с 2017 по 2023
- Получено 14 карт смещений,
- Рассчитаны среднегодовые скорости смещений за 2019-2023 (от -18 см до +8 мм в год)

Результаты плохо согласуются между собой

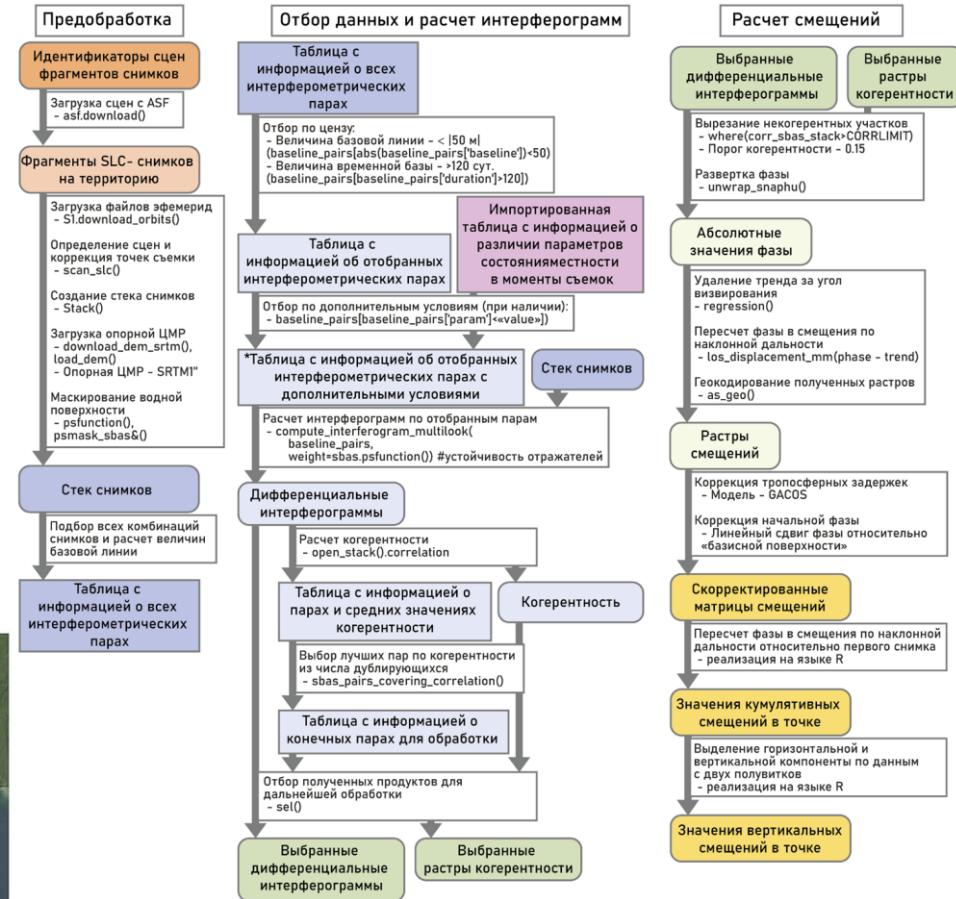
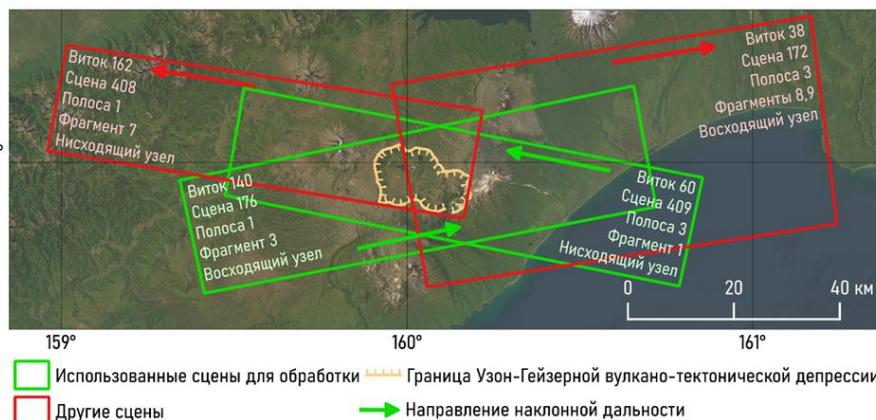


Используемые данные и ПО

Исходные данные:

- Восходящий узел - 76 снимков (2015-2024), 1 июля - 10 октября
- Нисходящий узел - 68 снимков (2016-2024), 1 июля - 10 октября

Геометрия сцен, покрывающих Узон-Гейзерную вулкано-тектоническую депрессию



Последовательность интерферометрической обработки на территории УГВТД с помощью библиотеки PyGMTSAR и других средств

Влияние среды на результаты интерферометрической обработки

1. Фазовые сдвиги

а) Тропосферные задержки [Hopfield, 1971]

- Температура воздуха
- Атмосферное давление
- Содержание влаги в атмосфере

б) Изменение диэлектрических свойств поверхности [Westerhoff, Steyn-Ross, 2020]

- Влажность подстилающей поверхности

в) Ионосферные задержки [Gray et al., 2000]

- Степень ионизации атмосферы

г) Блокирующие покровы

- Растительный покров [Zwieback, Hajnsek, 2016]
- Снежный покров [Benedikter et al., 2023]

д) Температурные расширения

- Температура поверхности [Ni et al., 2007]

2. Возникновение фазовой декорреляции

а) Атмосферная турбулентность

- Осадки [Yang et al., 2023]
- Водяной пар, аэрозоли [Ding et al., 2008]
- Локальные изменения температуры, влажности и давления воздуха [Li et al., 2022]

б) Изменение отражательных свойств поверхности и типа рассеяния

- Растительный покров [Чимитдоржиев и др., 2020]
- Влажность подстилающей поверхности [Molan et al., 2020]
- Снежный покров [Benedikter et al., 2023]
- Ветер [Santoro et al., 2010]
- Засоленность почвы/грунта [Xiang et al., 2021]

Анализ влияния параметров состояния среды на когерентность

Использованные для анализа
источники и данные:

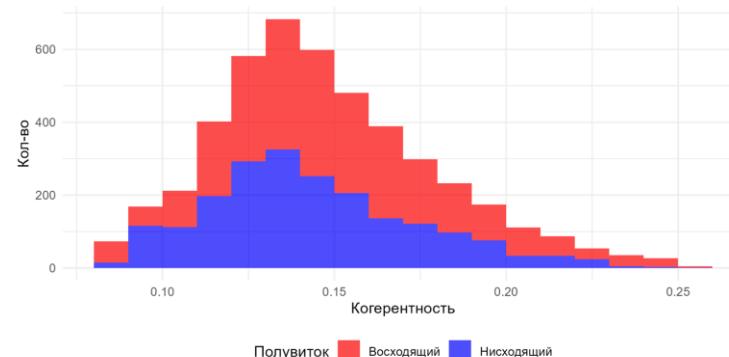
1) Модель реанализа ERA5

- Температура воздуха
- Атмосферное давление
- Парциальное давление водяного пара
- Температура почвы
- Объем влаги в почве
- Количество осадков в час между двумя измерениями

1) MODIS MOD13A2

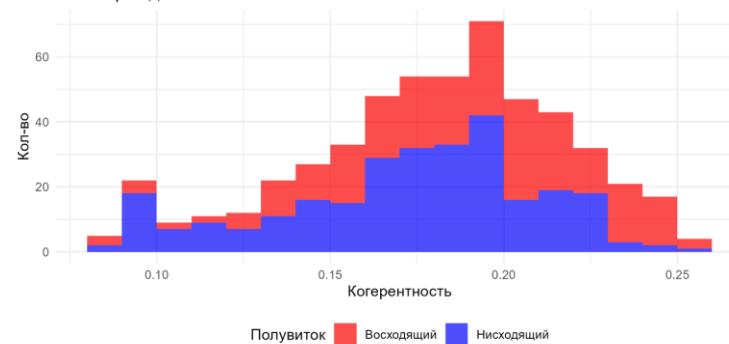
- NDVI
- ## 1) MODIS MOD10A1
- NDSI
 - Альбедо земной поверхности

Распределение значений когерентности



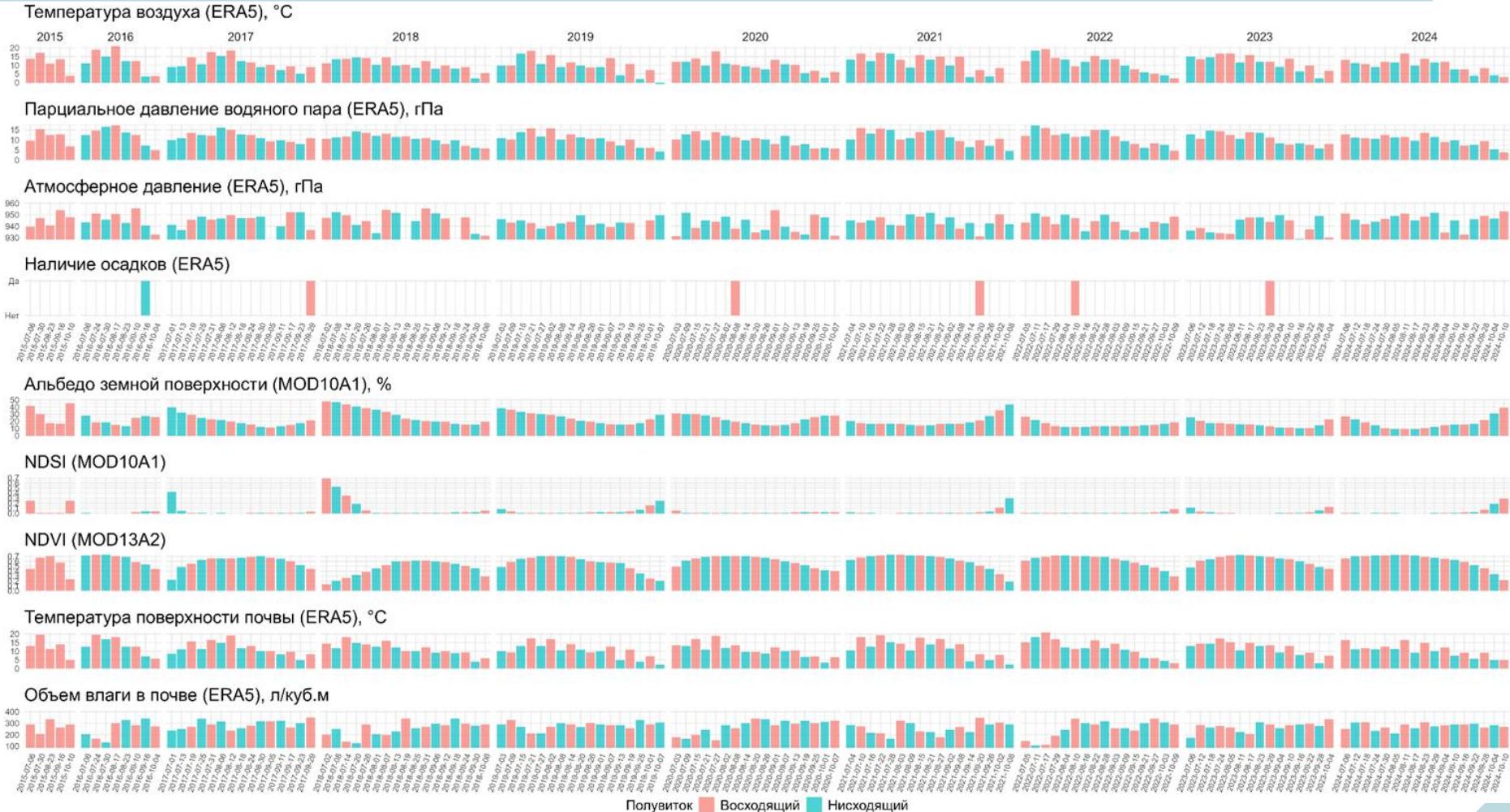
Распределение средних значений когерентности у интерферометрических пар с временной базой выше 1 года (всего 4631 пара)

Распределение значений когерентности в выборке для анализа



Распределение значений когерентности в выборке, использованной для выявления влияния параметров состояния среды на когерентность ($B < 70$, $T = 1$ год) (всего 543 пары)

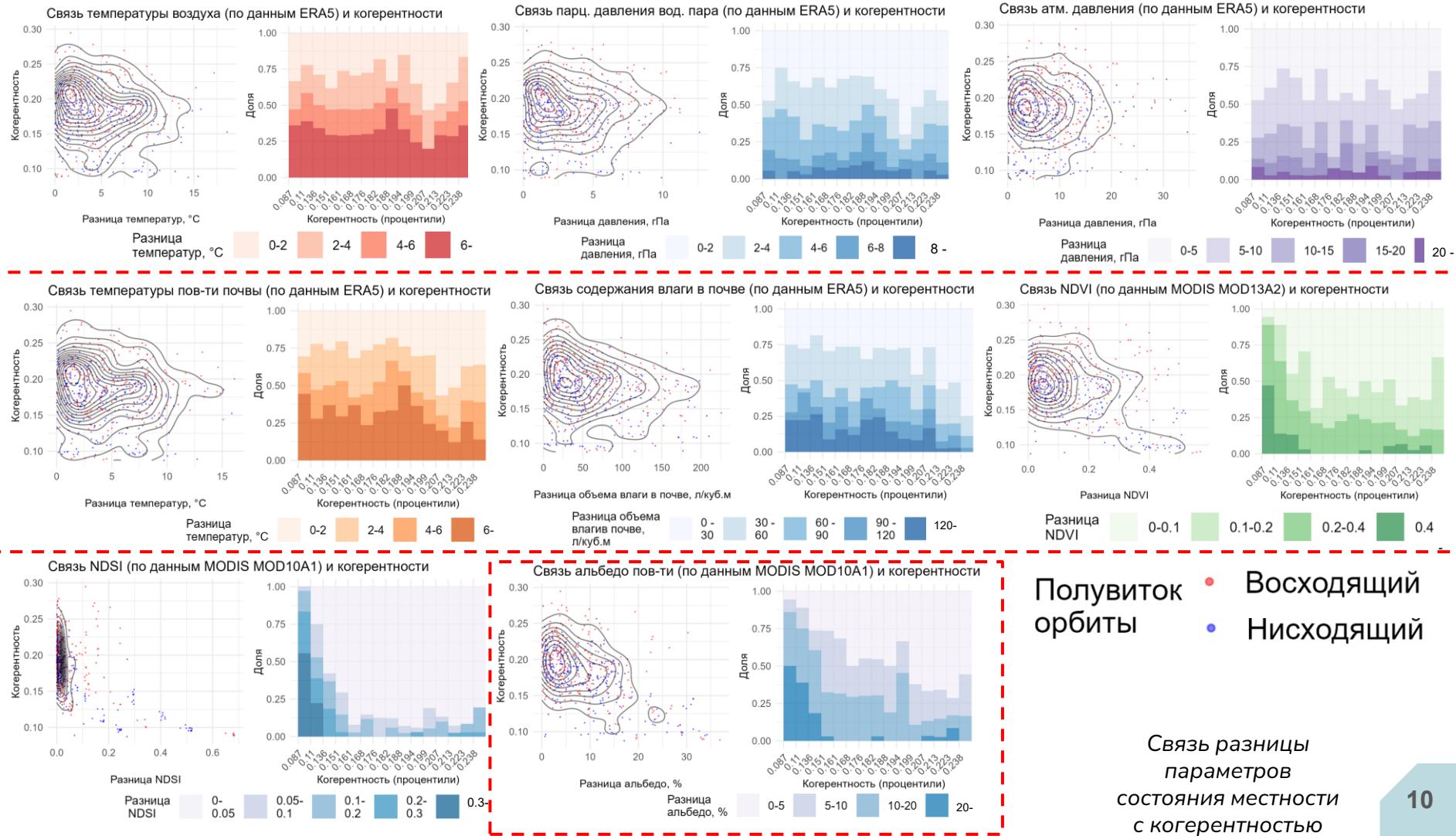
Анализ влияния параметров состояния среды на когерентность



Полувиток Восходящий Нисходящий

Значения использованных параметров

Анализ влияния параметров состояния среды на когерентность

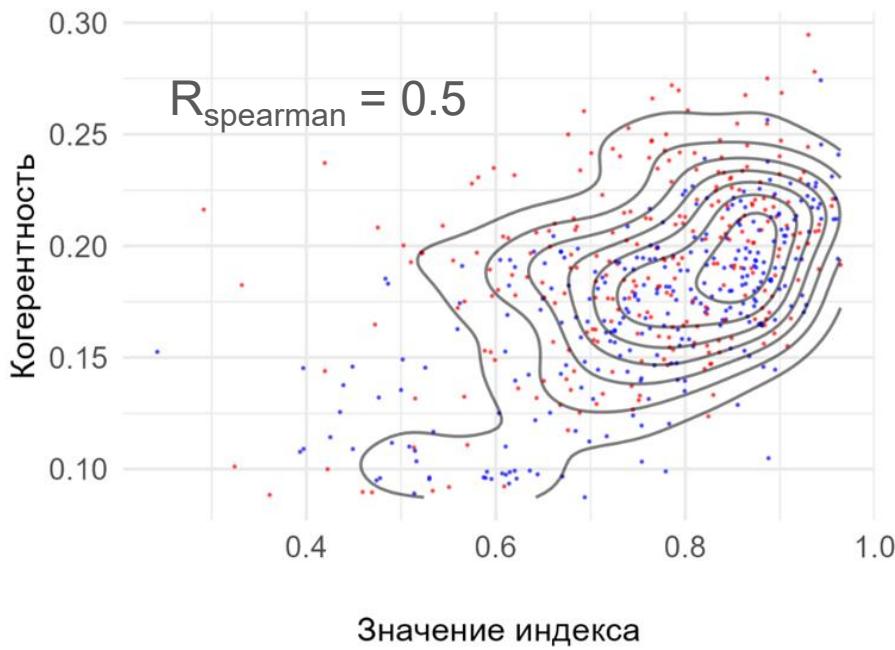


Формирование наборов интерферометрических пар

$$ИС = 1 - \left(\frac{NDVI}{NDVI_{max}} + \frac{A}{A_{max}} + \frac{t_{soil}}{t_{soil\ max}} + \frac{d_{soil}}{d_{soil\ max}} \right) / 4$$

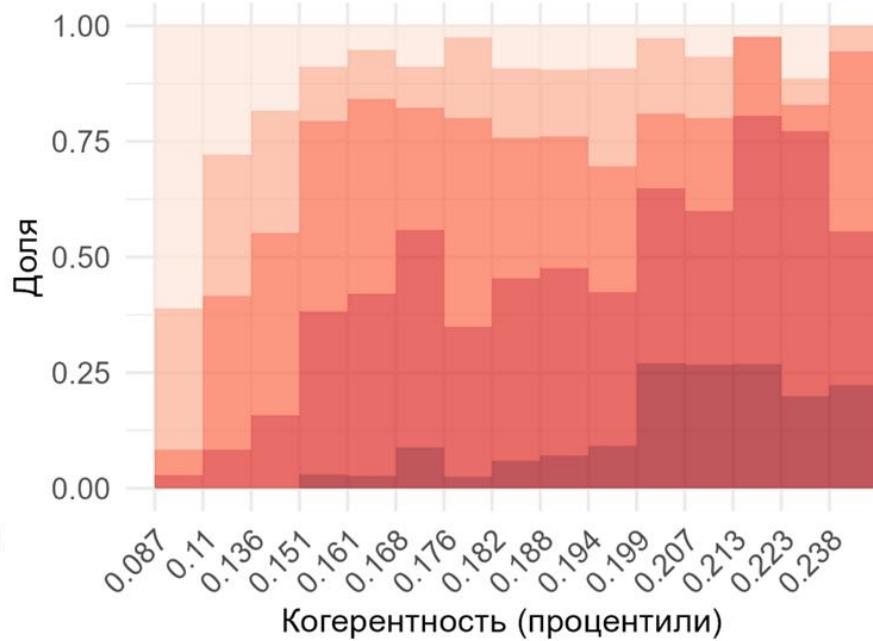
A - альбедо поверхности
t_{soil} - температура поверхности почвы
d_{soil} - влагосодержание почвы
max - наибольшая разница параметра в наборе

Связь выведенного индекса схожести и когерентности



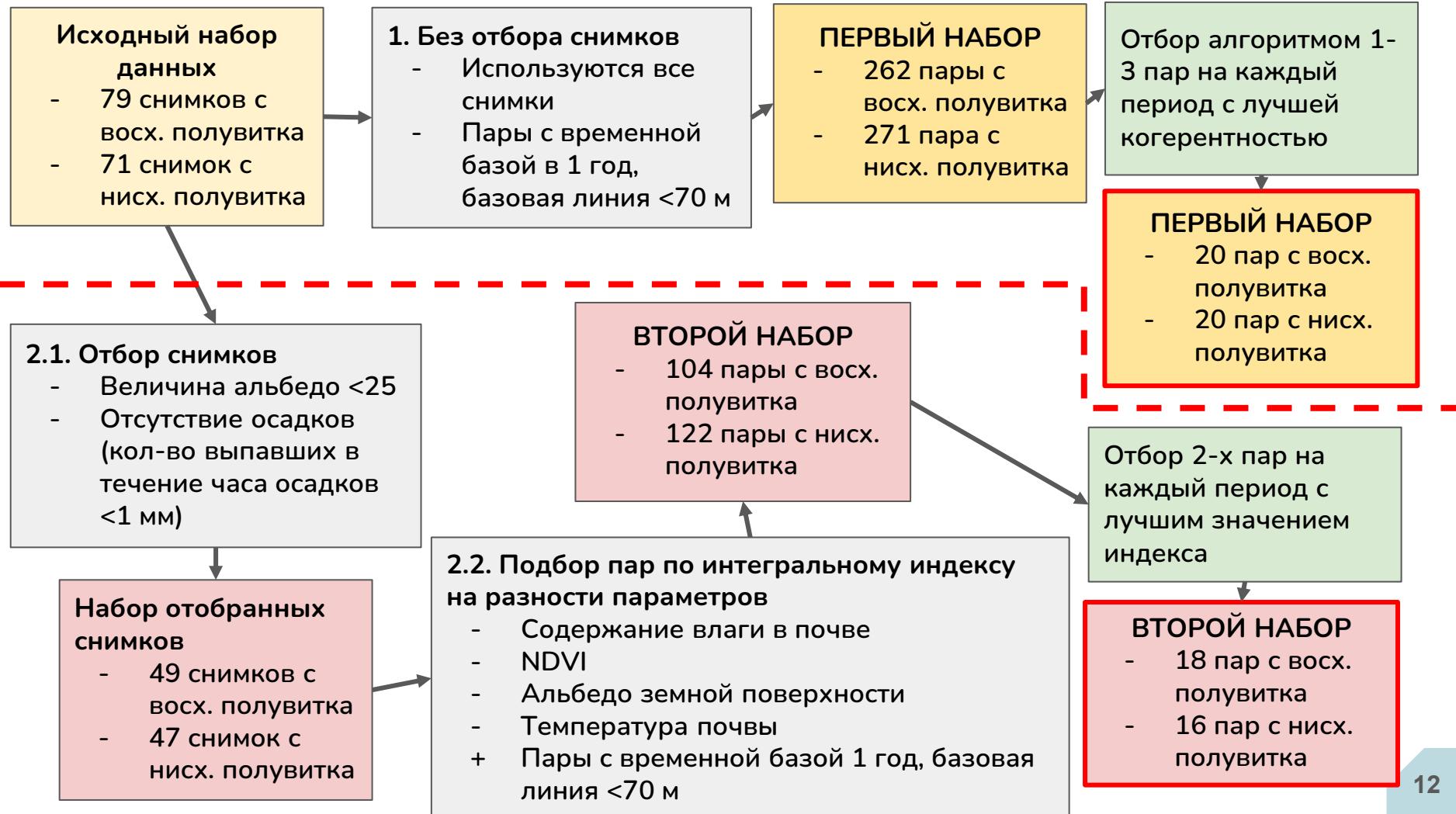
Полувиток
орбиты

• Восходящий • Нисходящий



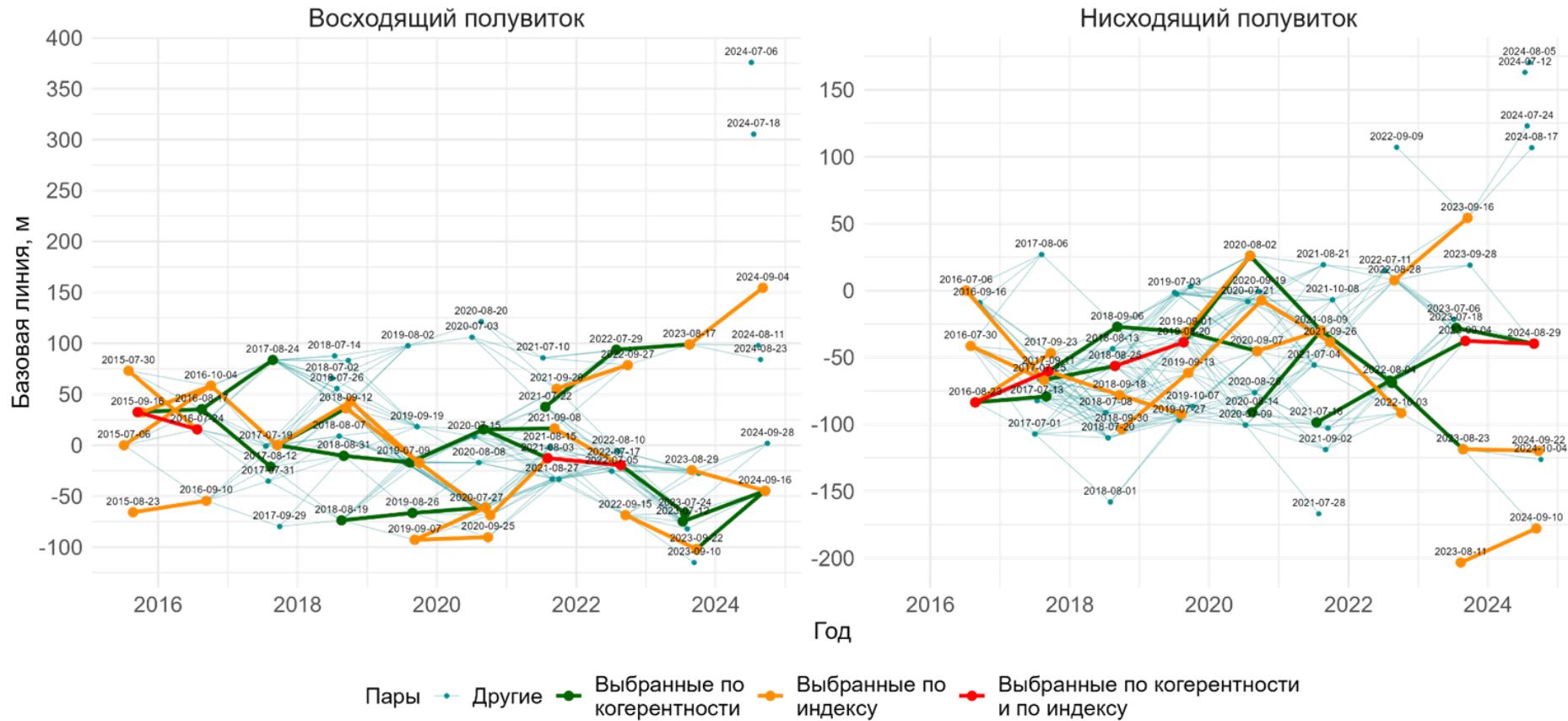
Значение индекса	<0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1

Формирование наборов интерферометрических пар



Формирование наборов интерферометрических пар

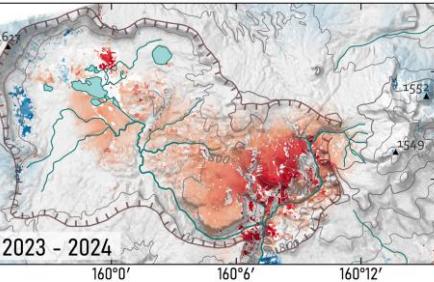
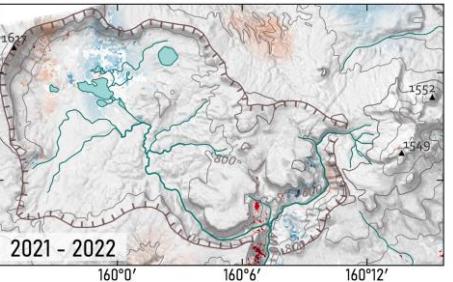
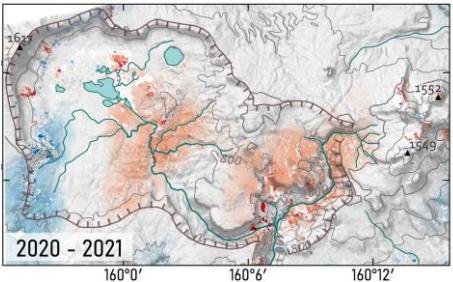
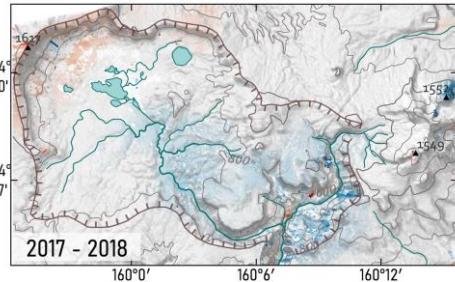
Интерферометрические пары по исходным данным и их наборы



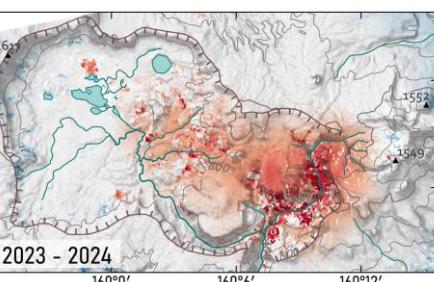
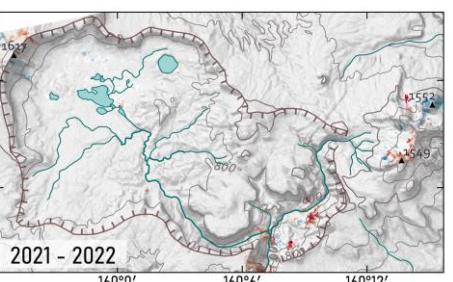
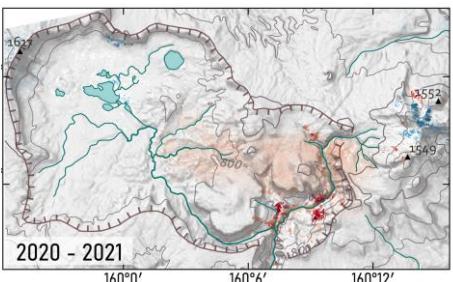
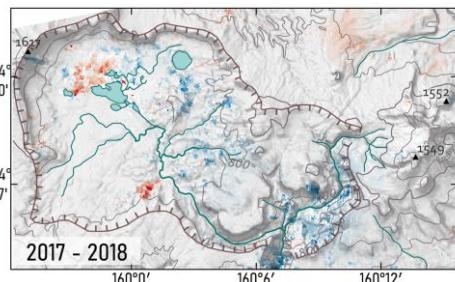
Распределение обработанных интерферометрических пар по наборам
и их величины базовой линии

Результаты (смещения по наклонной дальности)

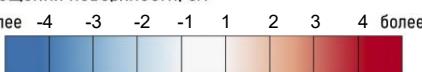
Восходящий полувиток



Нисходящий полувиток

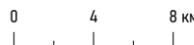


Смещения поверхности, см



Граница Узон-Гейзерной вулкано-
тектонической депрессии

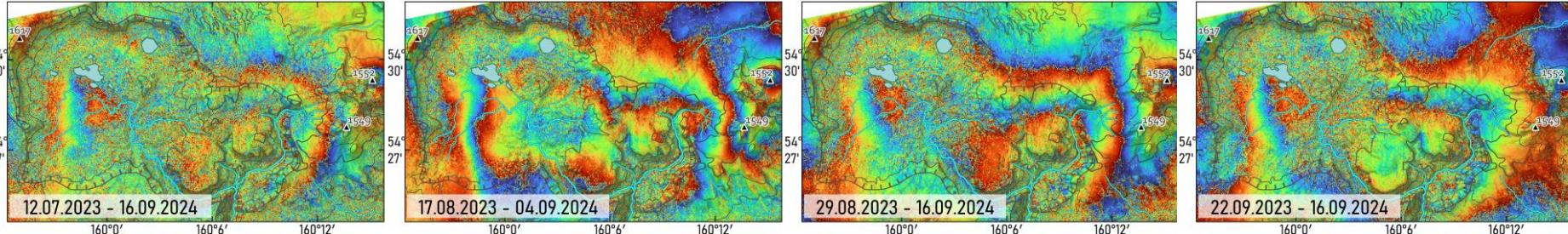
Сплошные горизонтали проведены через 200 м



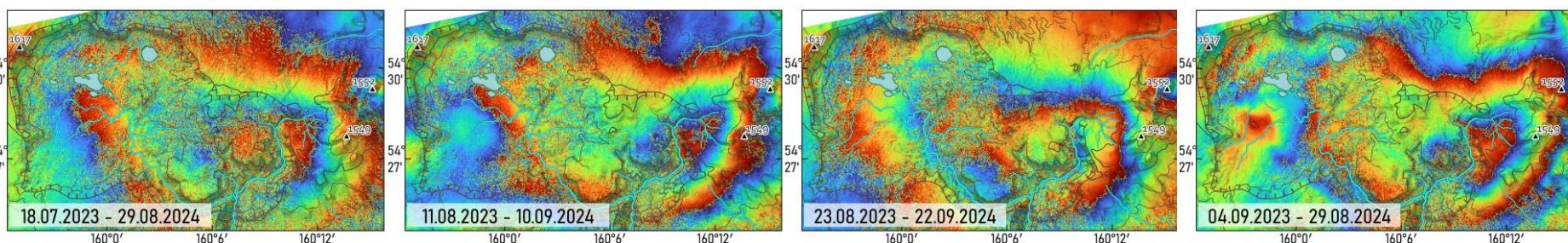
Некоторые цифровые модели смещений, полученные в
результате обработки данных с обоих узлов

Результаты (интерферограммы за 2023-2024 год)

Восходящий полувиток



Нисходящий полувиток



-3.14

0

3.14



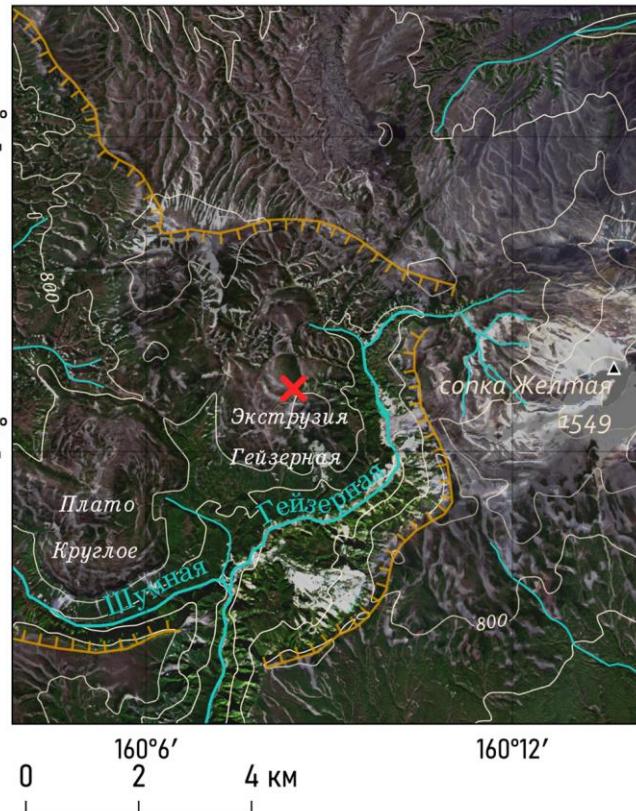
Граница Узон-Гейзерной вулкано-
тектонической депрессии

Сплошные горизонтали проведены через 200 м

0 4 8 км

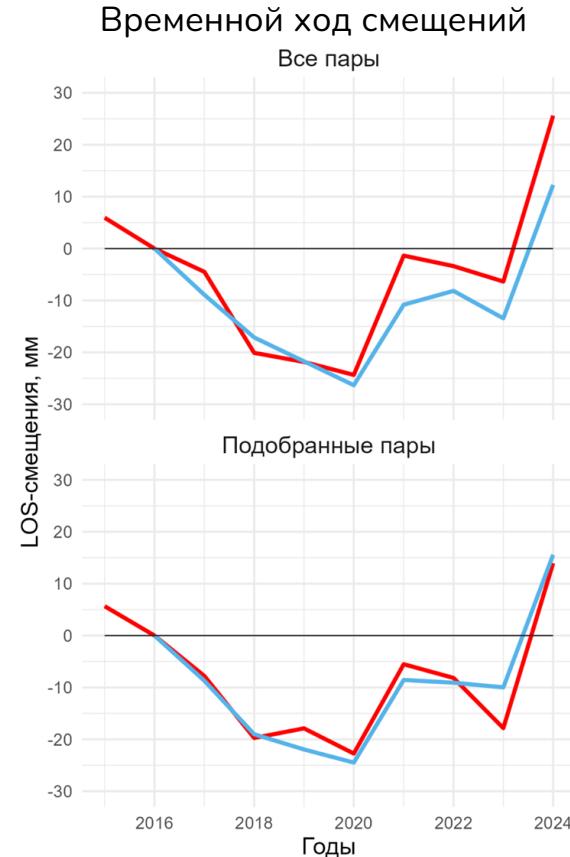
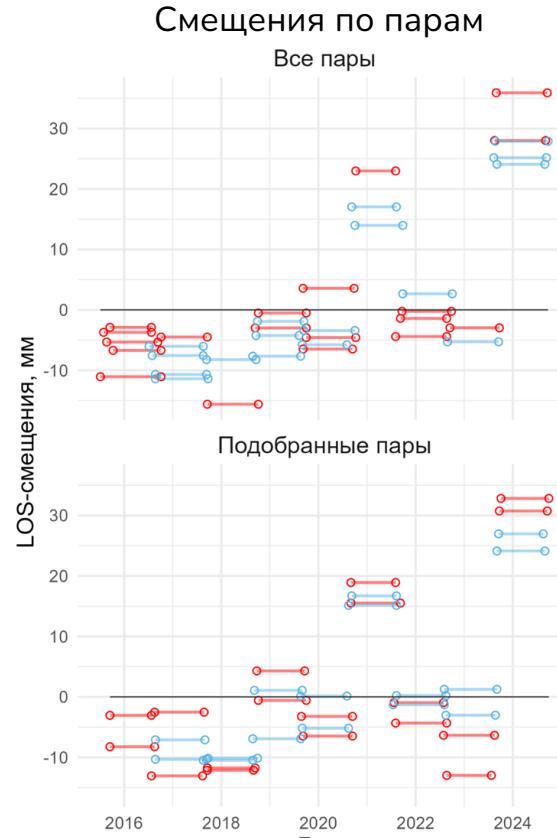
Интерферограммы за 2023-2024 с обоих полувитков

Анализ рассчитанных смещений в эпицентре поднятия



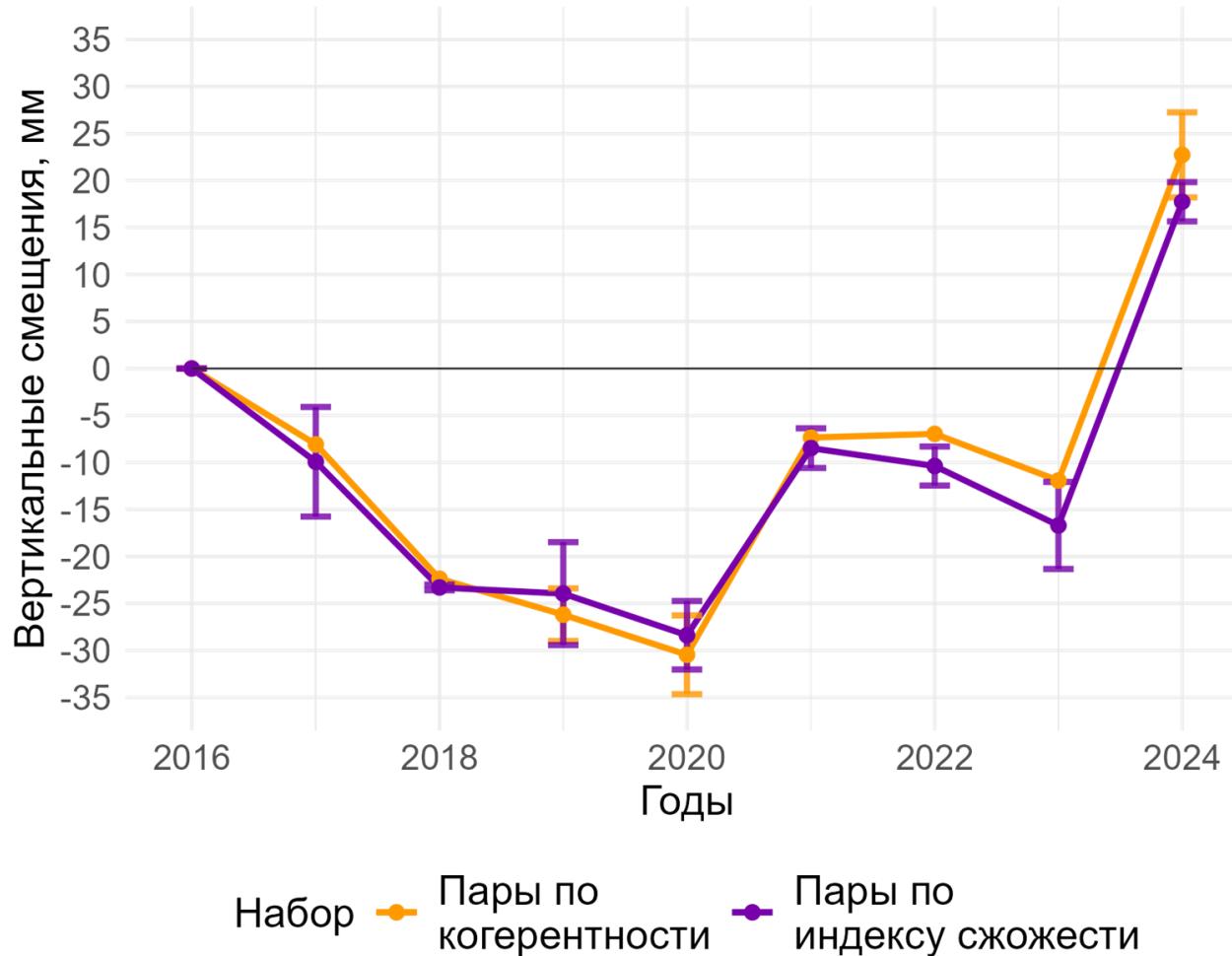
Область интереса
Граница Узон-Гейзерной
вулкано-тектонической депрессии

Выбранный для анализа участок



Анализ рассчитанных смещений в эпицентре поднятия

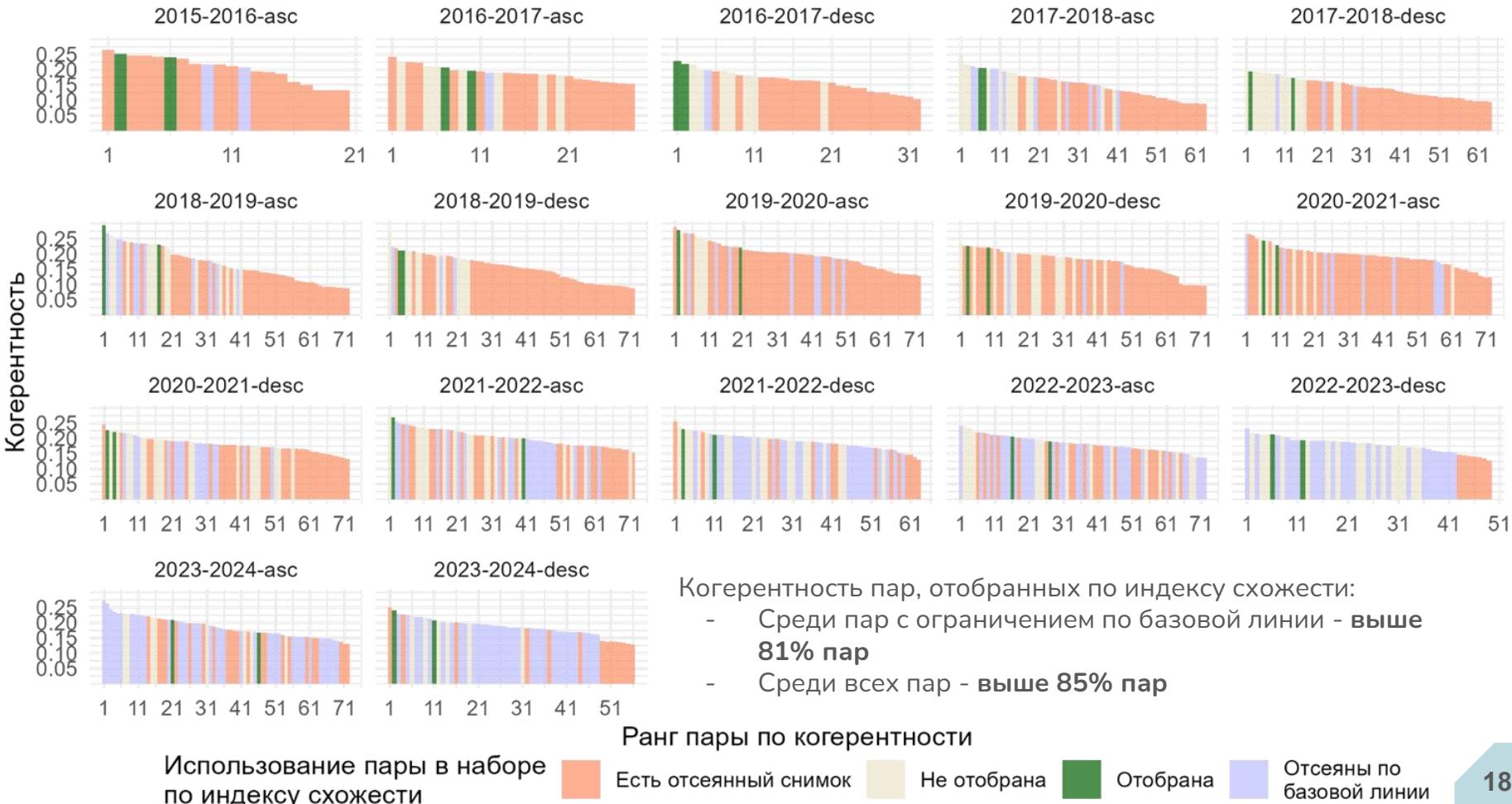
Ход вертикальных смещений по двум наборам



Вертикальные смещения
поверхности в точке интереса в
Узон-Гейзерной вулкано-
тектонической депрессии

Анализ качества отобранных пар

Анализ значений когерентности пар снимков в сформированных наборах



Результаты и выводы

Результаты

- На территории УГВТД выявлено поднятие на 3.5 см, произошедшее с 2023 по 2024 годы, которому предшествовали менее значительные вертикальные движения
- Отбор на основе совокупности параметров состояния местности и среды показал высокое качество результата, а значения смещений аналогичны получаемым методом малых базовых линий

Выводы

- Подбор пригодных интерферометрических пар для получения качественных результатов (смещений) возможен посредством анализа изменения характеристик местности и среды, которые можно получить по открытым источникам
- УГВТД в настоящий момент остается активной динамичной зоной, требующей продолжения мониторинга

