



# **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 вулcano-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.



## Узон-Гейзерная вулcano-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».

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

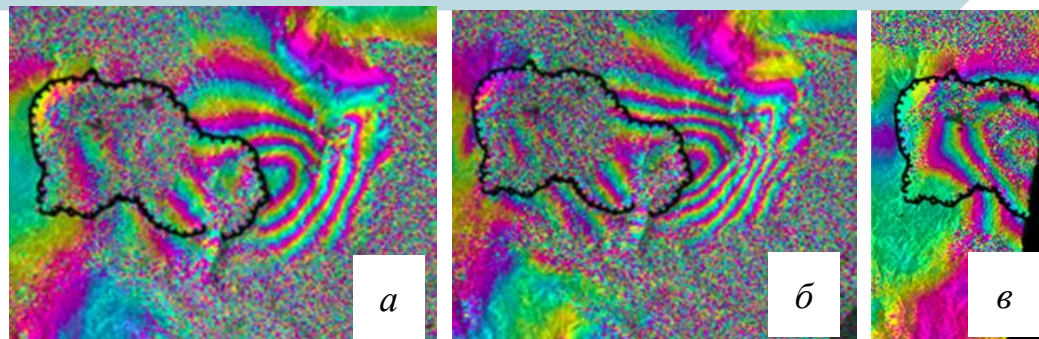




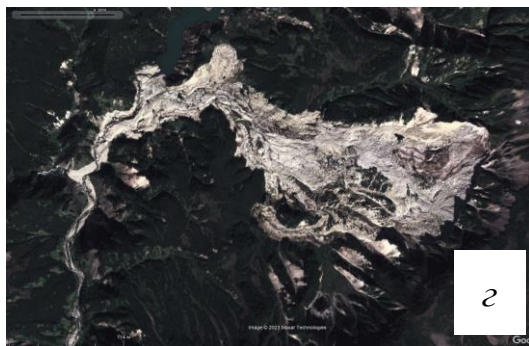
# Опыт выявления смещения на исследуемой территории [Lundgren, Lu, 2006], актуальность

Выявленные смещения:

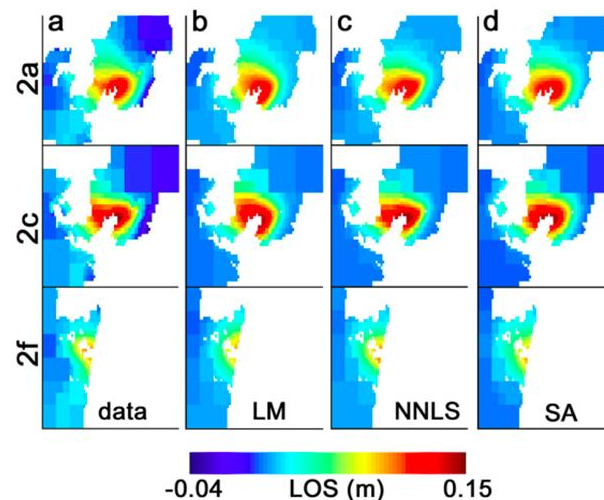
- Поднятия до 15 см за период с 2000 по 2003 гг.
- Площадь поднятия -  $15.4 \times 8.7$  км
- Одна из вероятных причин активизации склоновых процессов



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

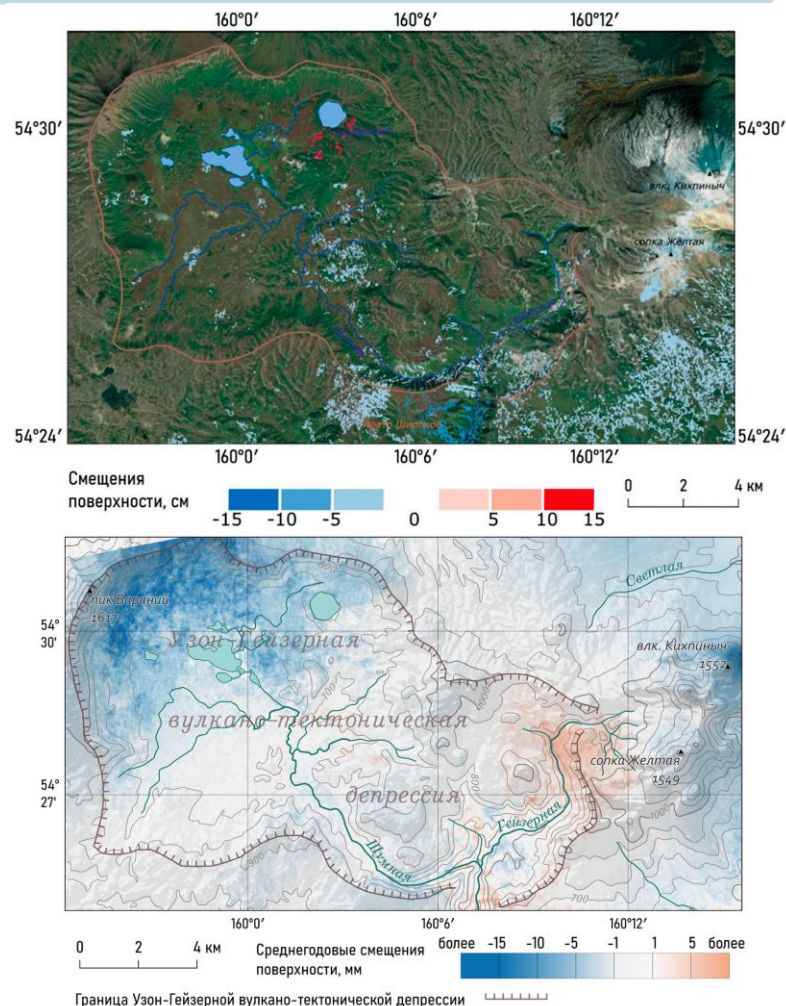
Ширшова и др., 2023:

- 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



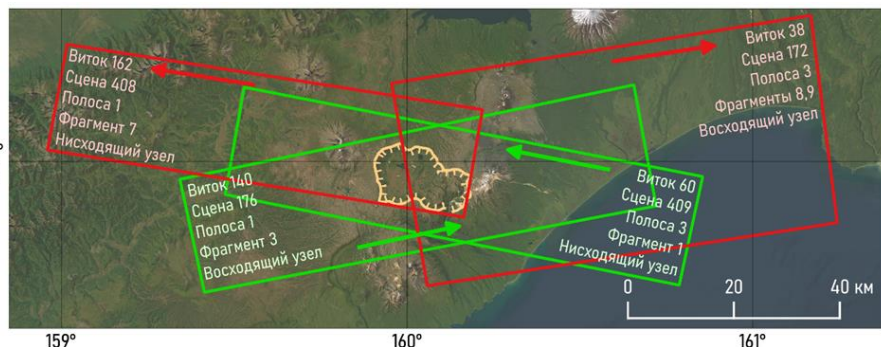


# Используемые данные и ПО

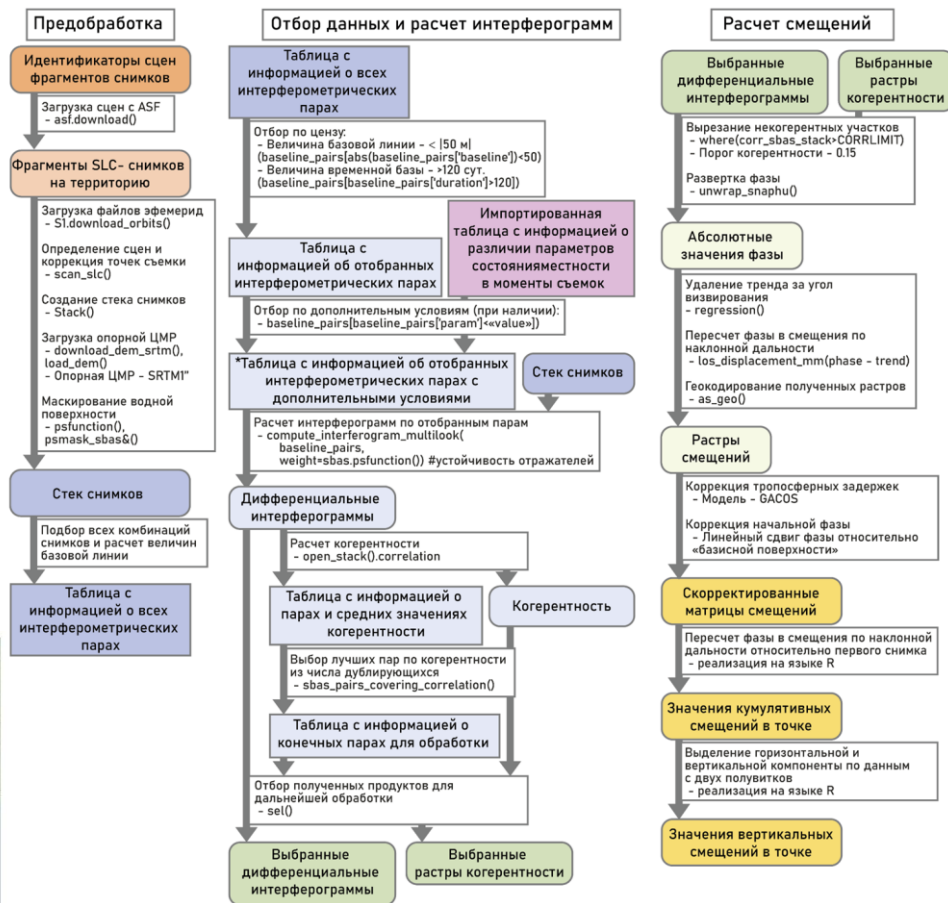
## Исходные данные:

- 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 вулcano-тектоническую депрессию



- Использованные сцены для обработки
- Граница Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии
- Другие сцены
- Направление наклонной дальности



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

## 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

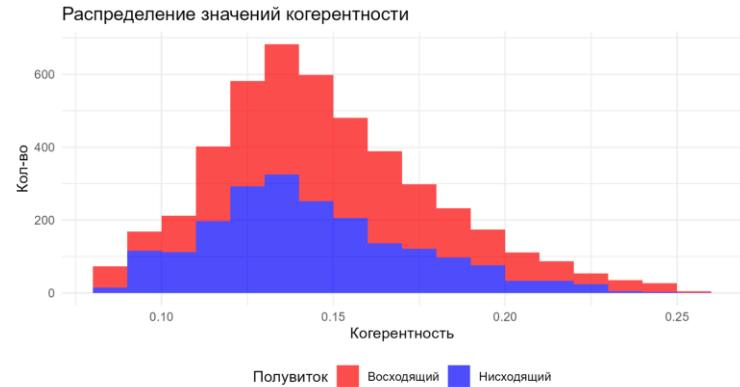
- Температура воздуха
- Атмосферное давление
- Парциальное давление водяного пара
- Температура почвы
- Объем влаги в почве
- Количество осадков в час между двумя измерениями

## 1) MODIS MOD13A2

- NDVI

## 1) MODIS MOD10A1

- NDSI
- Альbedo земной поверхности



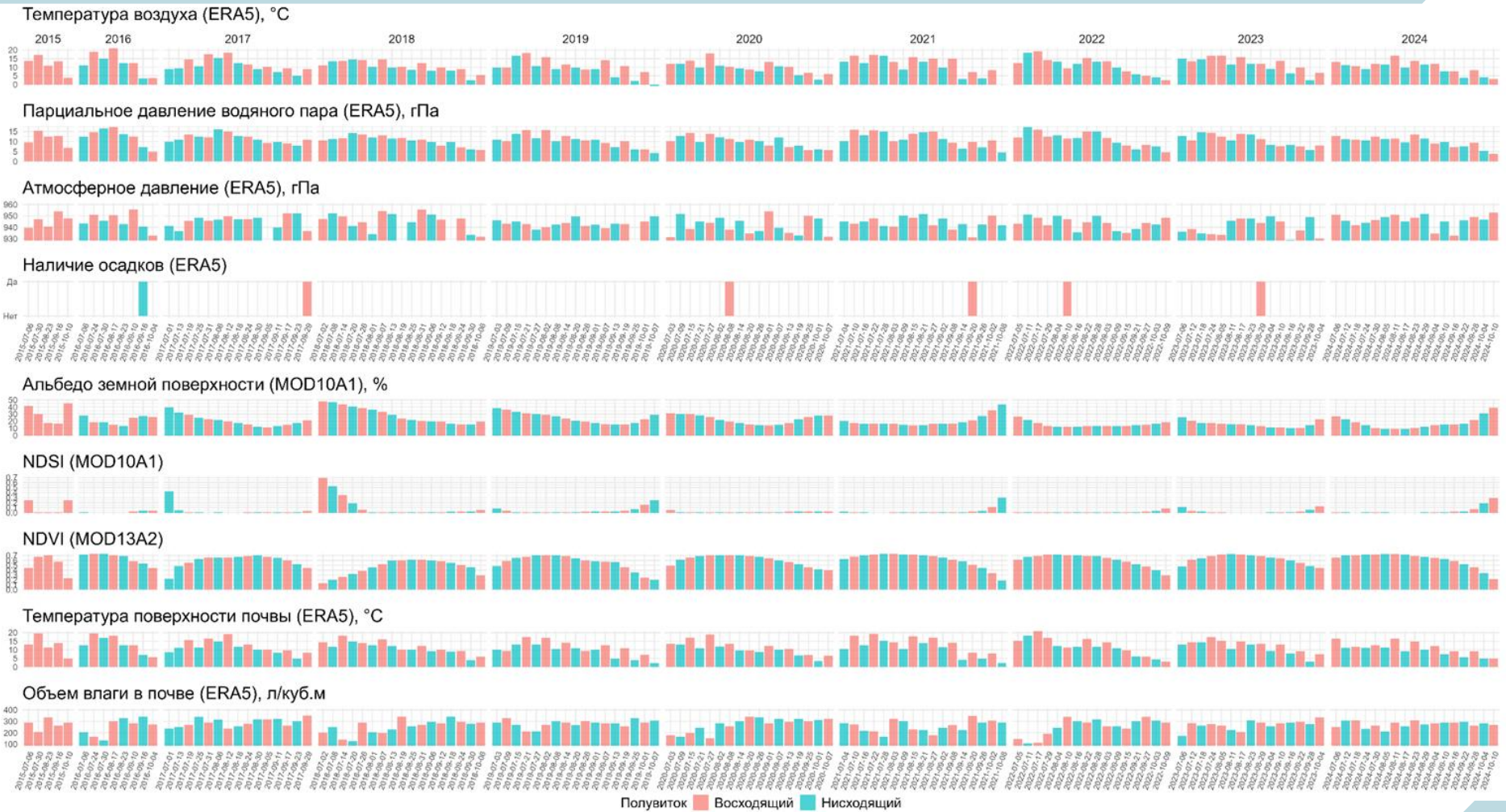
*Распределение средних значений когерентности у  
интерферометрических пар с временной базой выше 1 года  
(всего 4631 пара)*



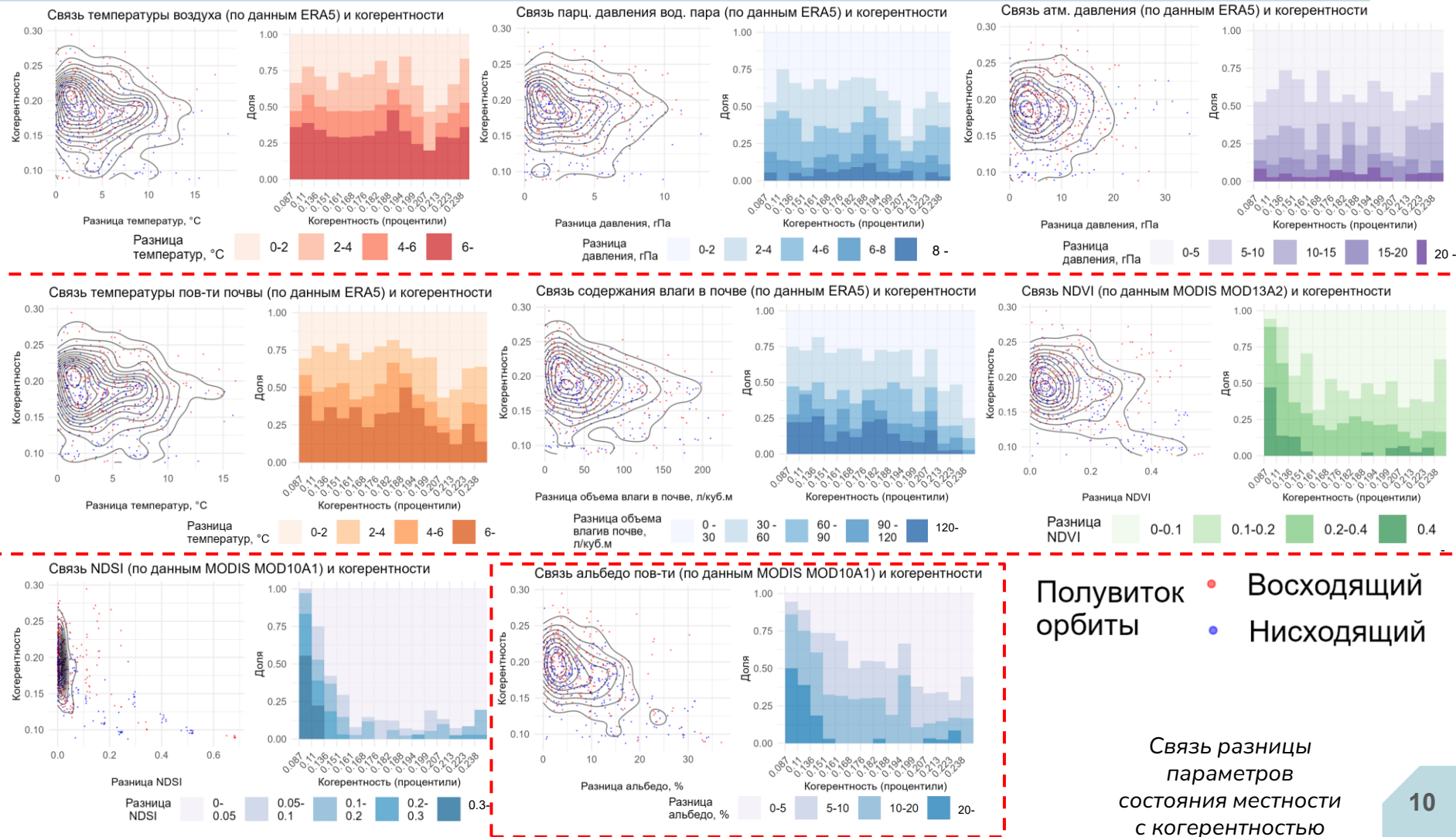
*Распределение значений когерентности в выборке, использованной  
для выявления влияния параметров состояния среды на  
когерентность ( $B < 70$ ,  $T = 1$  год) (всего 543 пары)*



# Анализ влияния параметров состояния среды на когерентность



# Анализ влияния параметров состояния среды на когерентность

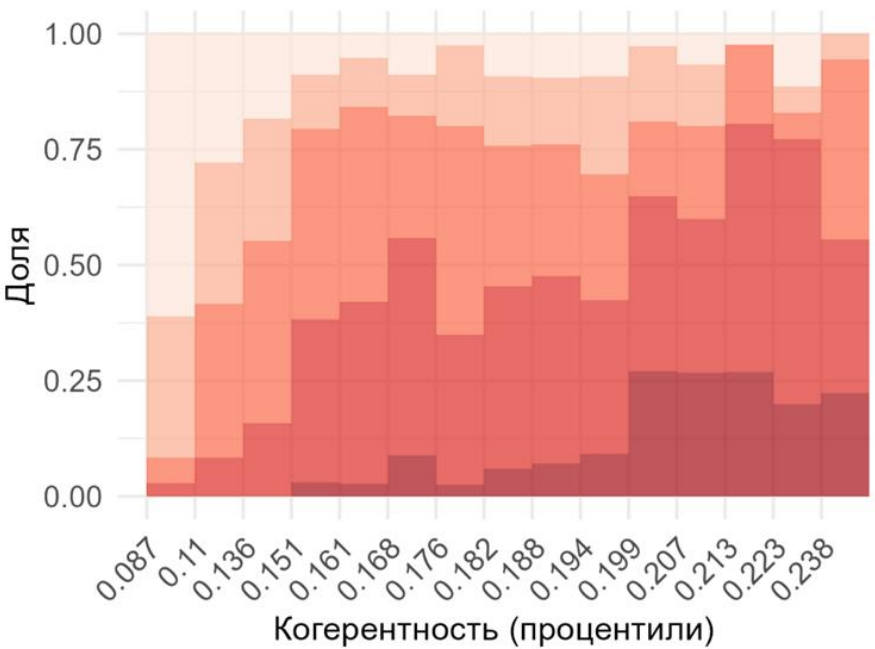
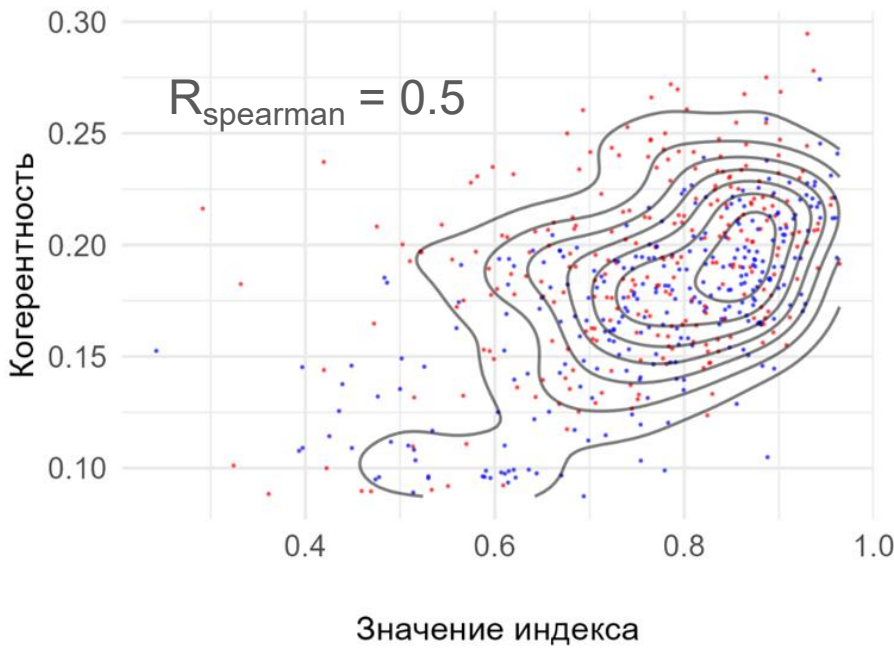


# Формирование наборов интерферометрических пар

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

A - альbedo поверхности  
t<sub>soil</sub> - температура поверхности почвы  
d<sub>soil</sub> - влагосодержание почвы  
max - наибольшая разница параметра в наборе

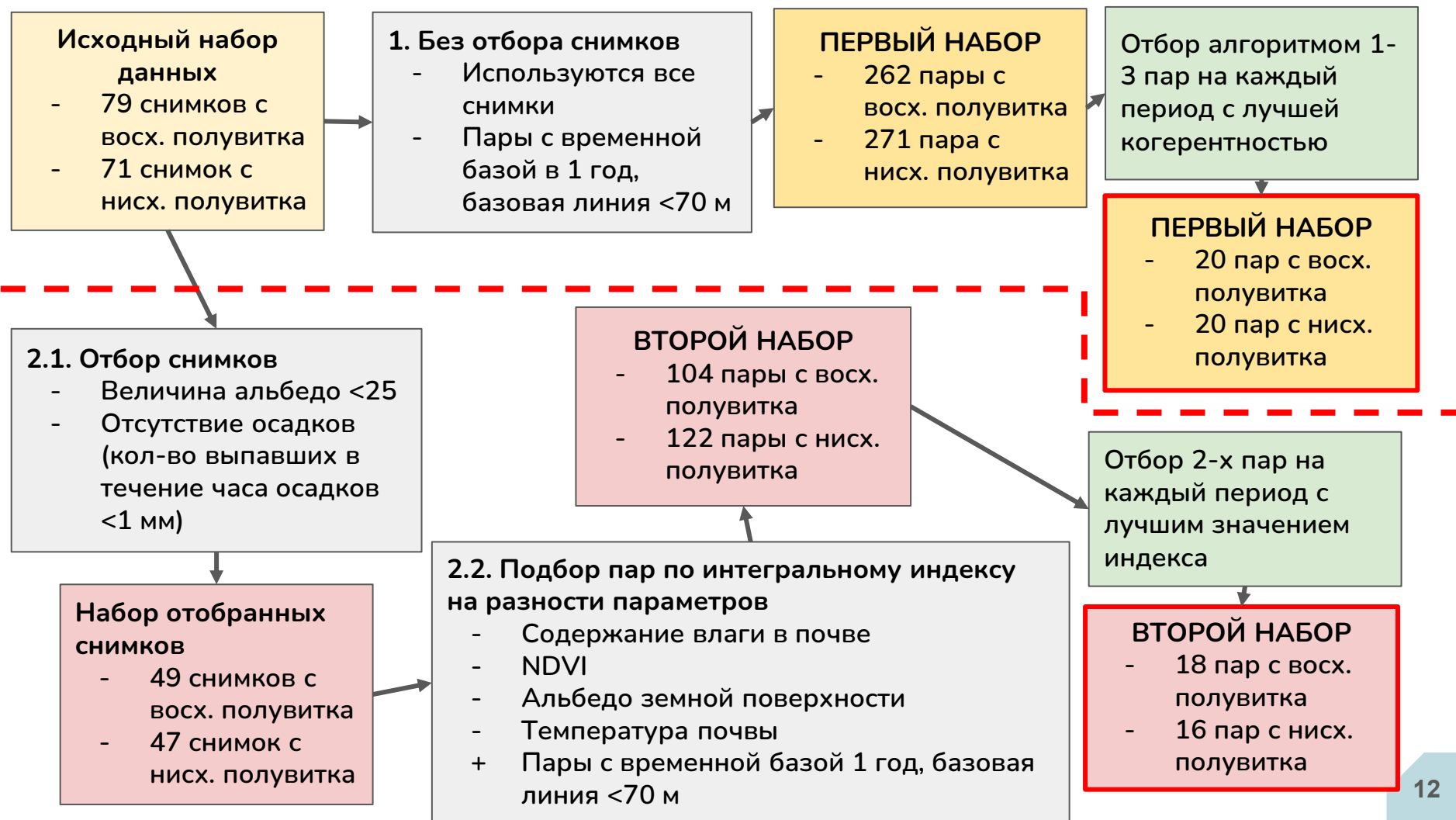
Связь выведенного индекса схожести и когерентности



Полувиток орбиты  
• Восходящий  
• Нисходящий

Значение индекса  
0.087 0.11 0.136 0.151 0.161 0.168 0.176 0.182 0.188 0.194 0.199 0.207 0.213 0.223 0.238  
Когерентность (процентиля)  
0.00 0.25 0.50 0.75 1.00  
0.6 0.6-0.7 0.7-0.8 0.8-0.9 0.9-1

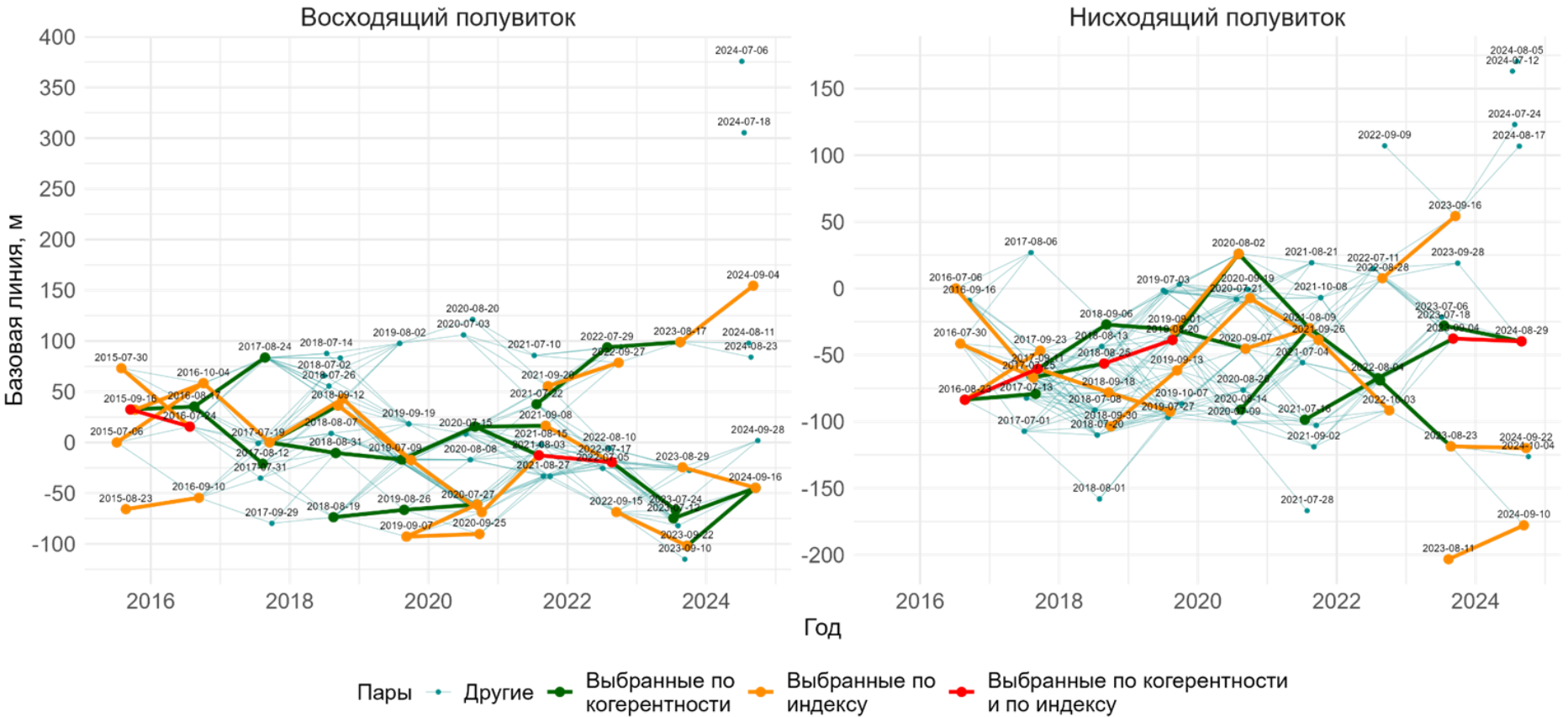
# Формирование наборов интерферометрических пар





# Формирование наборов интерферометрических пар

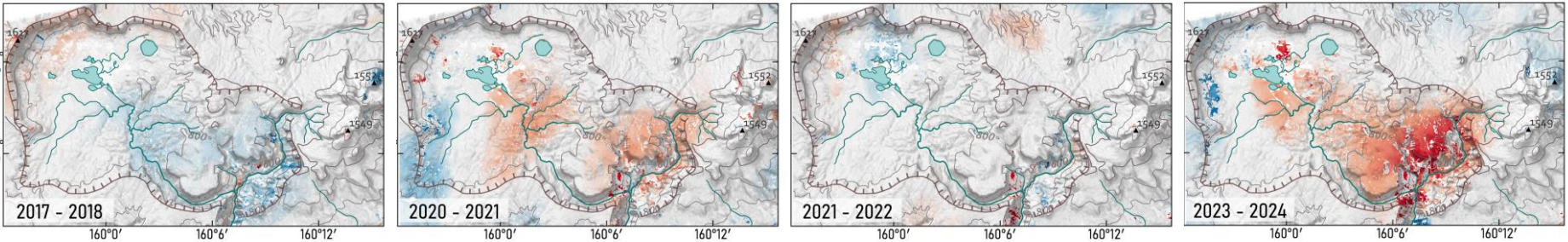
## Интерферометрические пары по исходным данным и их наборы



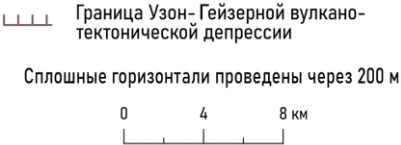
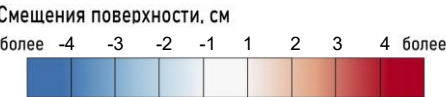
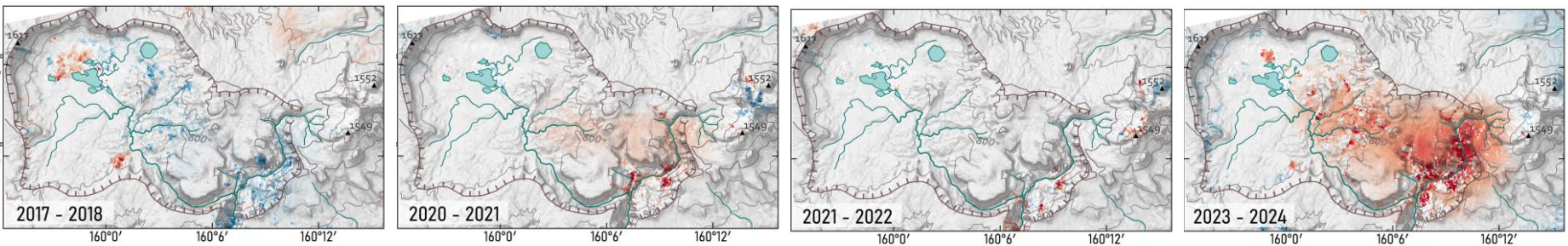
Распределение обработанных интерферометрических пар по наборам и их величины базовой линии

# Результаты (смещения по наклонной дальности)

## Восходящий полувиток



## Нисходящий полувиток

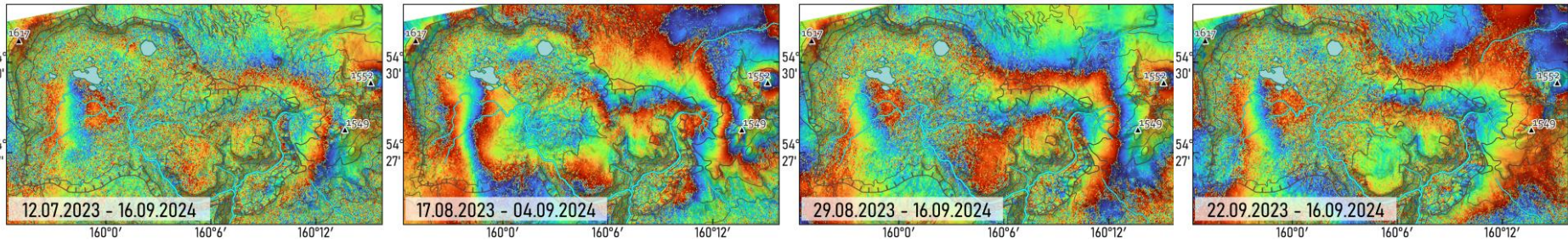


Некоторые цифровые модели смещений, полученные в результате обработки данных с обоих узлов

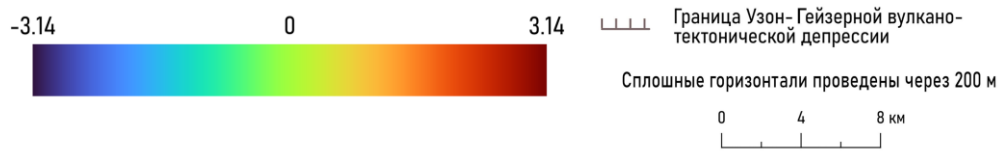
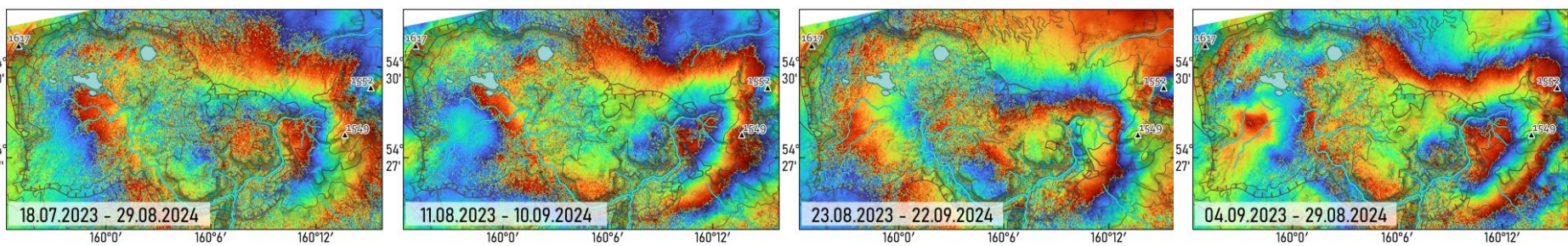


# Результаты (интерферограммы за 2023-2024 год)

## Восходящий полувиток

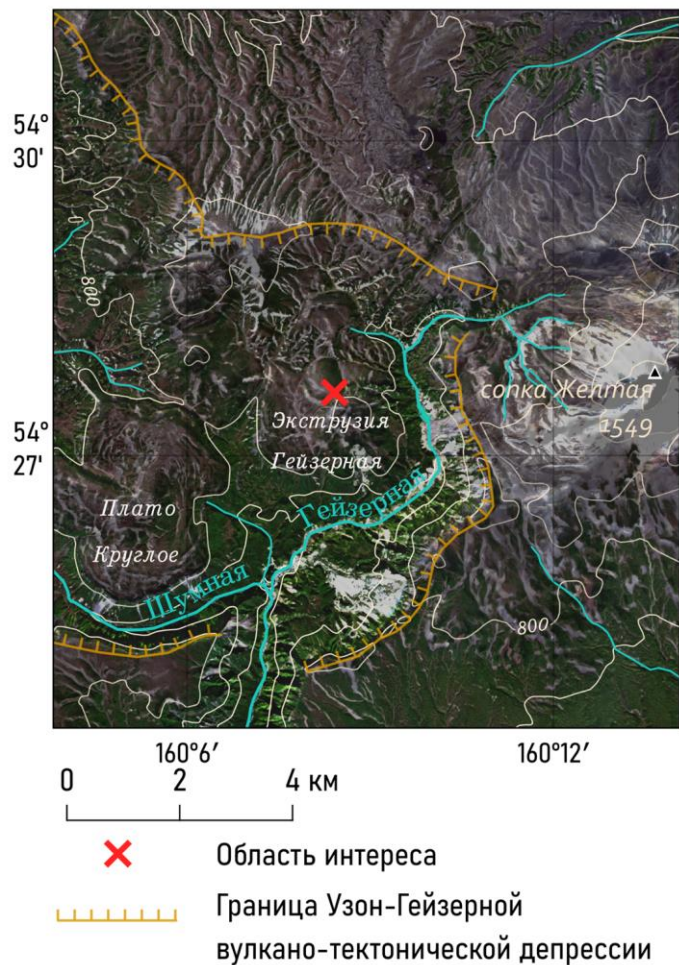


## Нисходящий полувиток

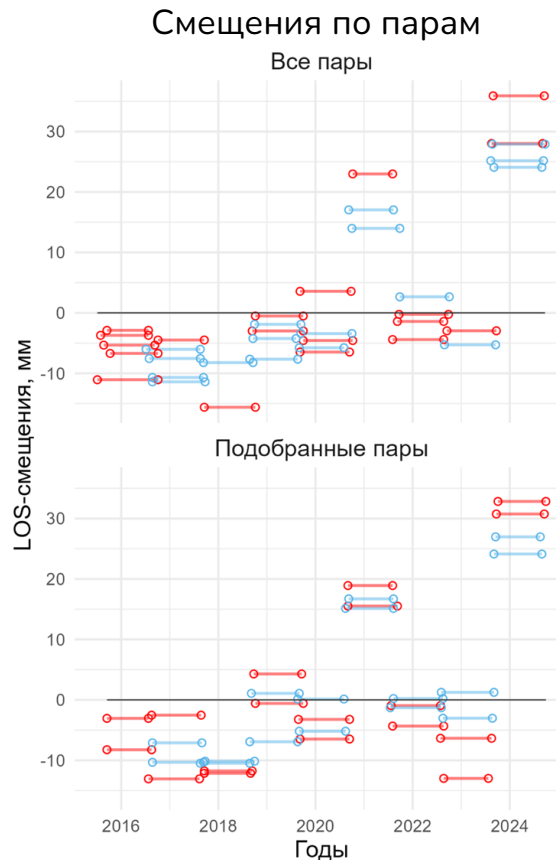


Интерферограммы за 2023-2024 с обоих полувитков

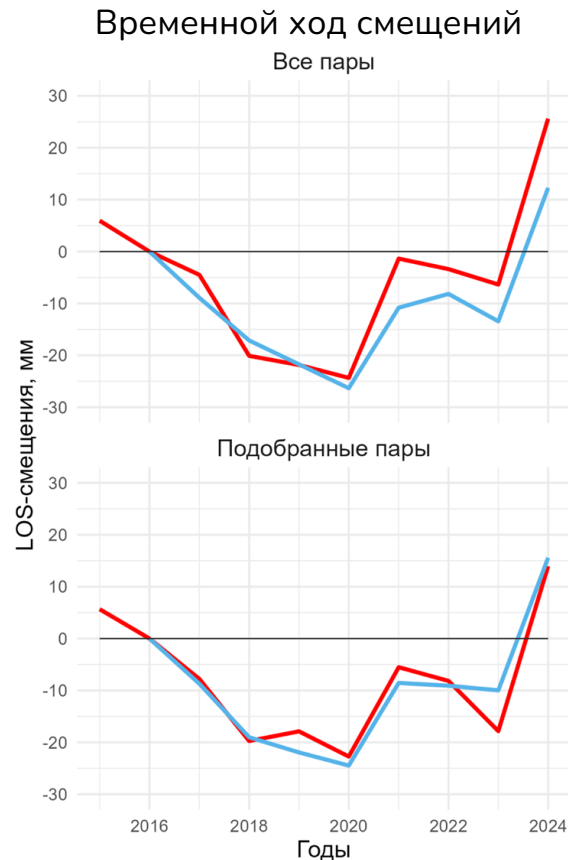
# Анализ рассчитанных смещений в эпицентре поднятия



Выбранный для анализа участок

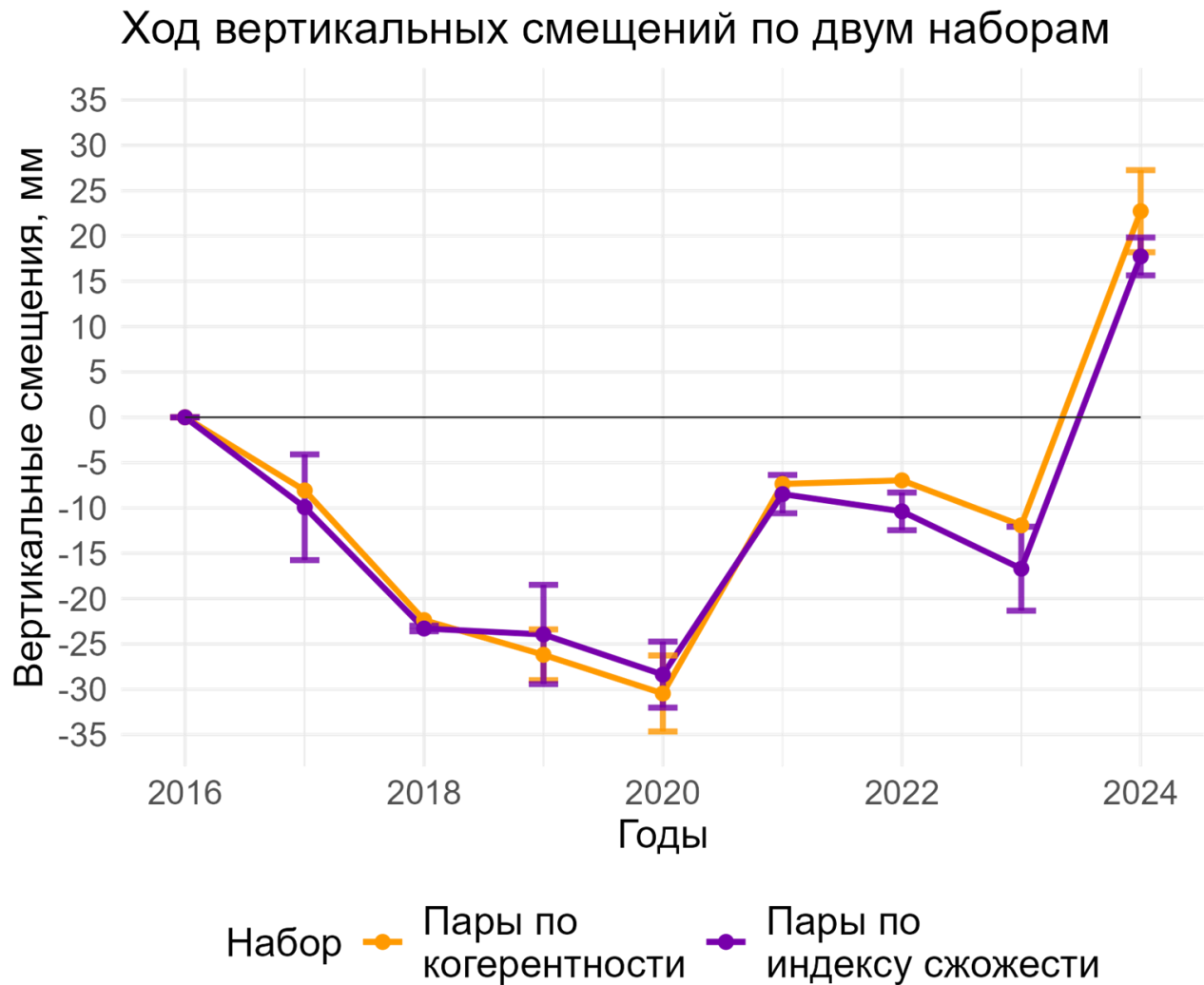


Полувиток орбиты — Восходящий — Нисходящий





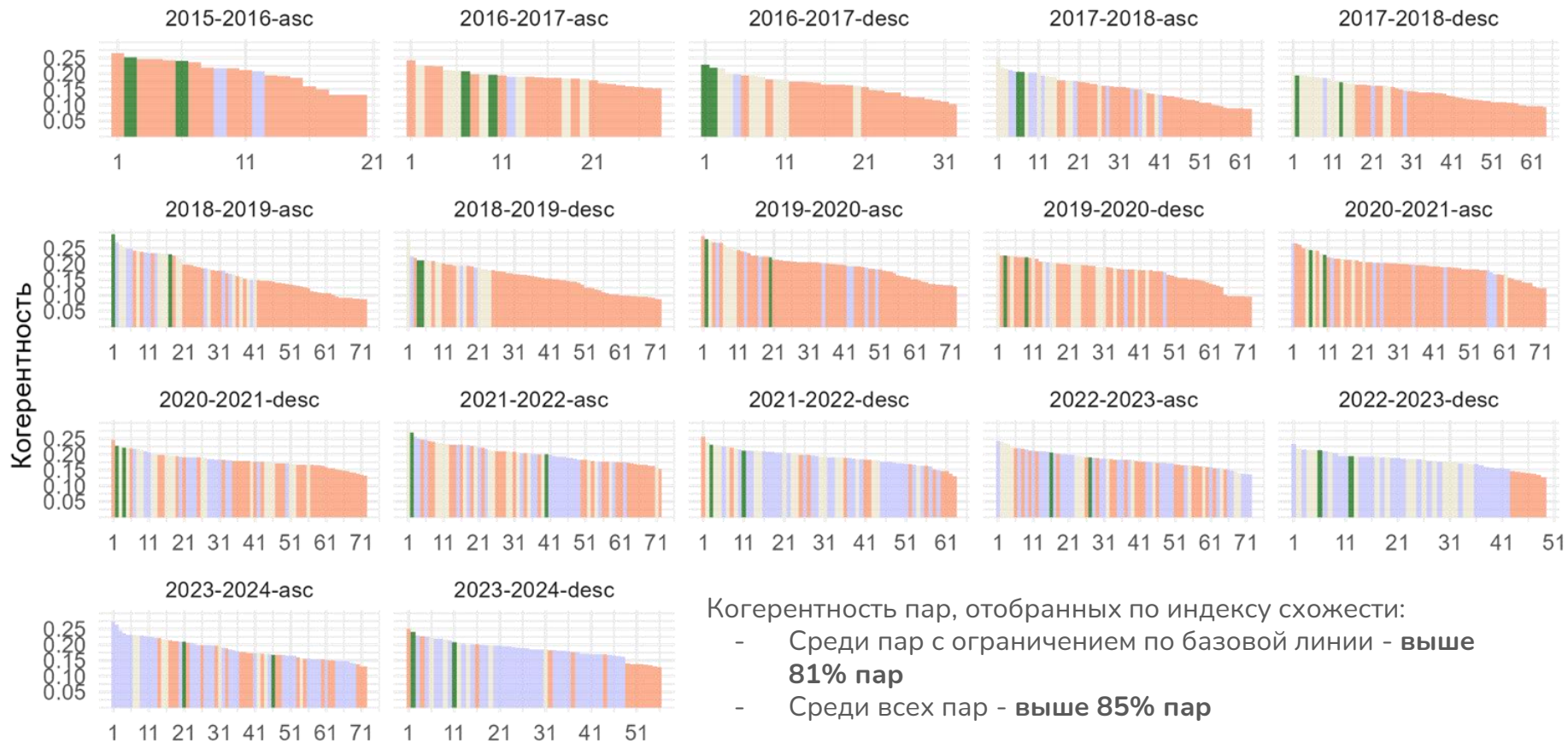
# Анализ рассчитанных смещений в эпицентре поднятия



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

# Анализ качества отобранных пар

## Анализ значений когерентности пар снимков в сформированных наборах



Когерентность пар, отобранных по индексу схожести:

- Среди пар с ограничением по базовой линии - **выше 81% пар**
- Среди всех пар - **выше 85% пар**

# 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

