

**XXII международная конференция  
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ  
КОСМОСА»  
11 - 15 ноября 2024 г.**

**Использование метода взвешенного усреднения  
интерферограмм для анализа изменений высоты  
лесного полога**

Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А. В., Номшиев Ж.Д., Худайбердиева О.А.  
ИФМ СО РАН, г. Улан-Удэ.

# Актуальность исследования: ежегодное обновление глобальных карт распределения биомассы леса

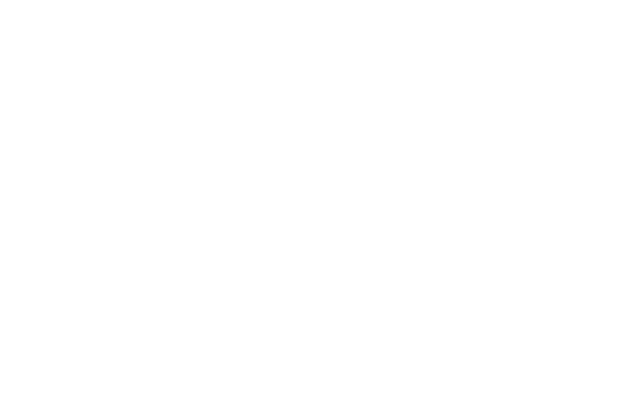


Карта составлена по данным радиолокатора ALOS-2 PALSAR-2 за 2019 г. и была представлена JAXA на PI Meeting (20-24 января 2020 г., Токио). Карта биомассы леса будет использована для оценок углеродного стока.











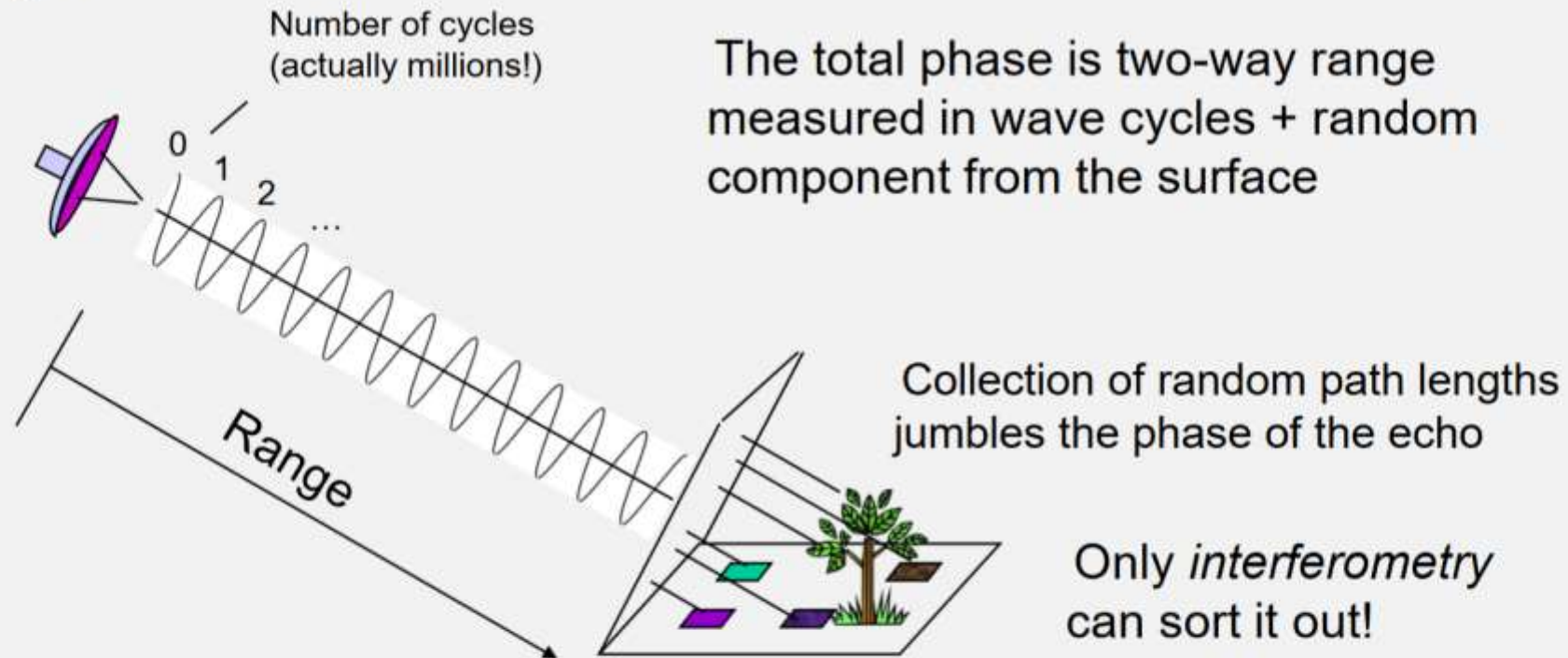
2022 г.





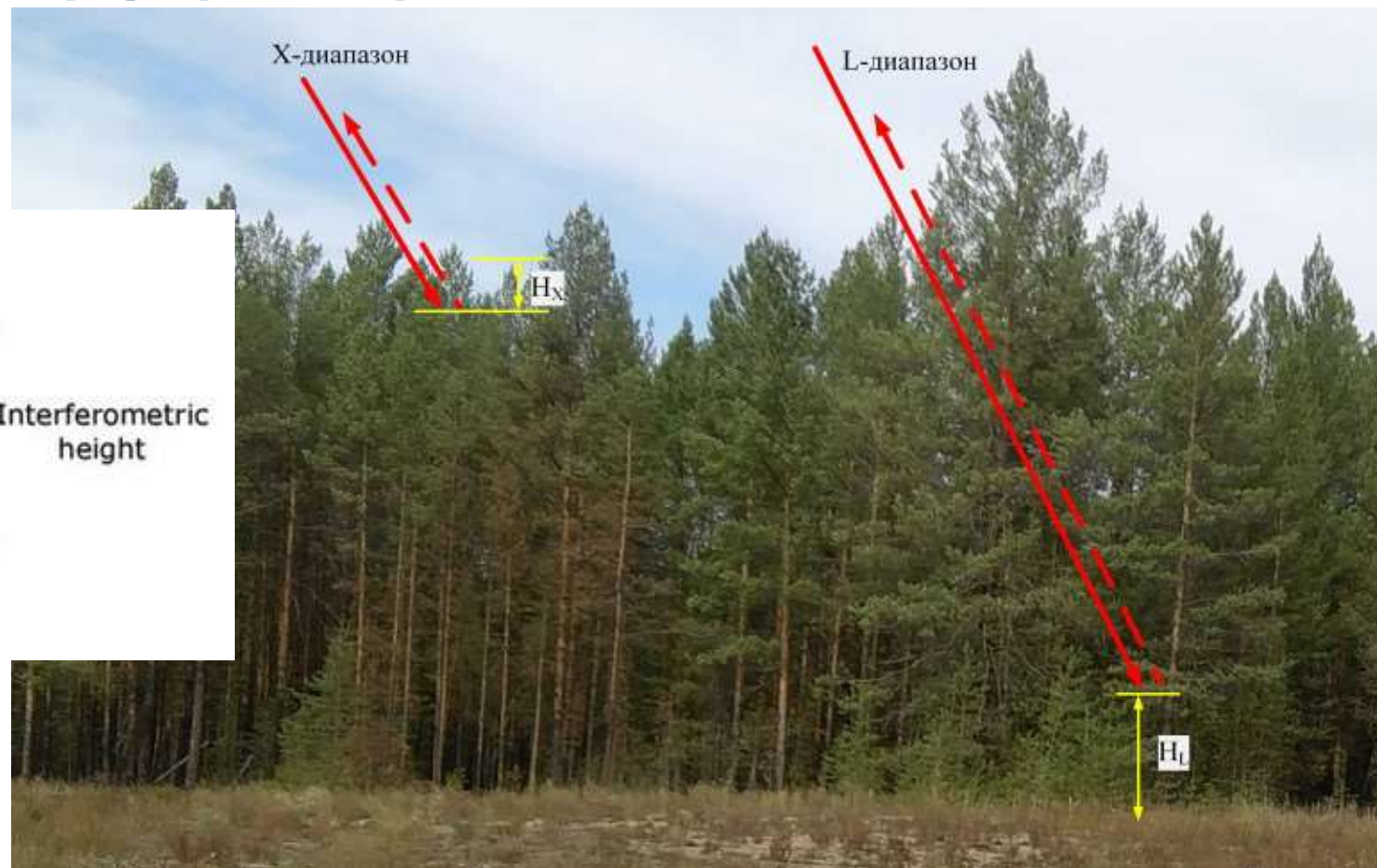
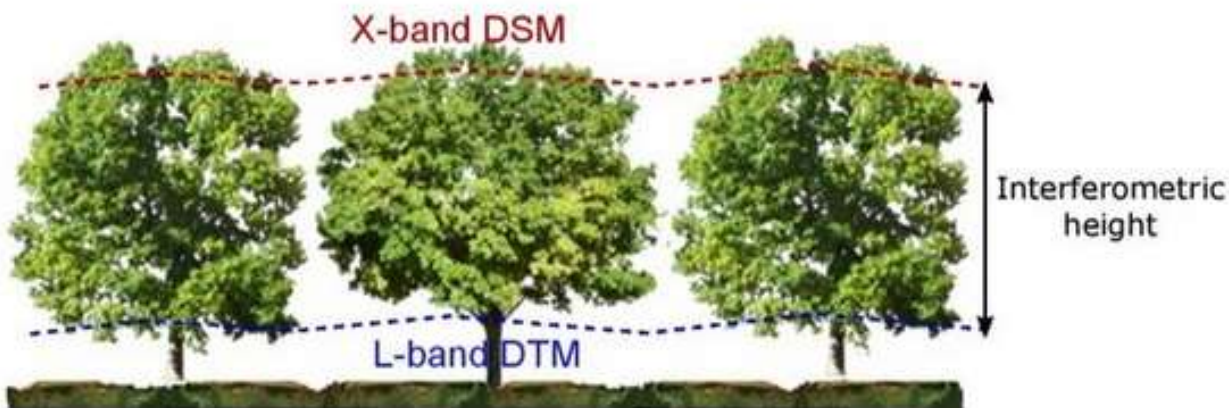
# SAR Phase - A Measure of the Range and Surface Complexity

The phase of the radar signal is the number of *cycles of oscillation* that the wave executes between the radar and the surface and back again.



Slide Courtesy of Paul Rosen (JPL)

# Измерение высоты лесного полога на основе радарной интерферометрии



Kleanthis Karamvasis and Vassilia Karathanassi "Forest canopy height estimation using double-frequency repeat pass interferometry", Proc. SPIE 9535, Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2015), 95350G (19 June 2015); <https://doi.org/10.1117/12.2192581>

Дистанционные оптико-микроволновые измерения параметров леса: современное состояние исследований и экспериментальная оценка возможностей / Т. Н. Чимитдоржиев, А. В. Дмитриев, И. И. Кирбижекова [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 4. – С. 9-26. – DOI 10.21046/2070-7401-2018-15-4-9-24.

## Multi-temporal interferometric synthetic aperture radar (MT-InSAR) technology:

- Persistent Scatterer Interferometry
- Small Baseline Subset
- Stacking-InSAR



Для расчета скорости смещений использовался метод Stacking-InSAR. Суть метода Stacking-InSAR сводится к взвешенному суммированию всех  $N$  развернутых интерферометрических фаз  $\varphi_j$  с весами, пропорциональными их временной базе  $\Delta T_j$  ( $j = \overline{1, N}$ ). Среднюю скорость изменения фазы, описывающей смещения, можно записать в виде

$$\bar{\varphi} = \sum_{j=1}^N \varphi_j \Delta T_j / \sum_{j=1}^N \Delta T_j^2.$$

Тогда средняя скорость деформаций вдоль линии обзора радиолокатора (англ. LOS) выражается формулой

$$v_{\text{деф}} = -\lambda \bar{\varphi} / 4\pi.$$

## **Ранее этот метод был апробирован авторами в следующих работах:**

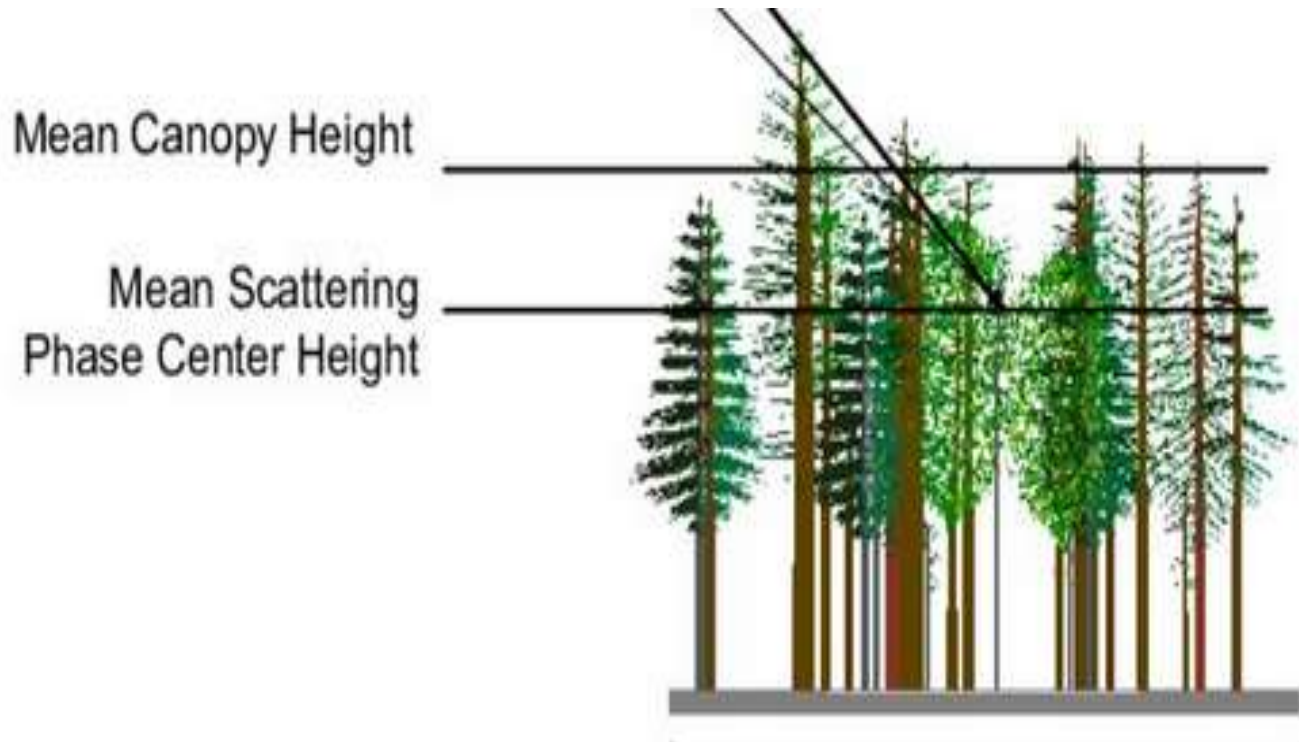
- Бондур, В. Г. Аномальная геодинамика перед землетрясением 2023 г. В Турции по данным спутниковой радарной интерферометрии 2018–2023 гг / В. Г. Бондур, Т. Н. Чимитдоржиев, А. В. Дмитриев // Исследование Земли из космоса. – 2023. – № 3. – С. 3-12. – DOI 10.31857/S0205961423030090.
- Bondur, V. G. The Induced Seismicity Effect in Morocco Caused by a Reduced Aquifers Volume according to Stacking-InSAR Method and Gravimetric Data / V. G. Bondur, T. N. Chimitdorzhiev, A. V. Dmitriev // Doklady Earth Sciences. – 2024. – Vol. 517, No. 1. – P. 1269-1275. – DOI 10.1134/s1028334x24601809.

**Скорости смещения, полученные с помощью Stacking-InSAR и SBAS-InSAR, совпадают; средняя разница в скорости смещения между двумя методами составляет 2,7 мм/год, а стандартное отклонение - 5,1 мм/год.**

Xu, Y.; Li, T.; Tang, X.; Zhang, X.; Fan, H.; Wang, Y. Research on the Applicability of DInSAR, Stacking-InSAR and SBAS-InSAR for Mining Region Subsidence Detection in the Datong Coalfield. *Remote Sens.* **2022**, *14*, 3314. <https://doi.org/10.3390/rs14143314>

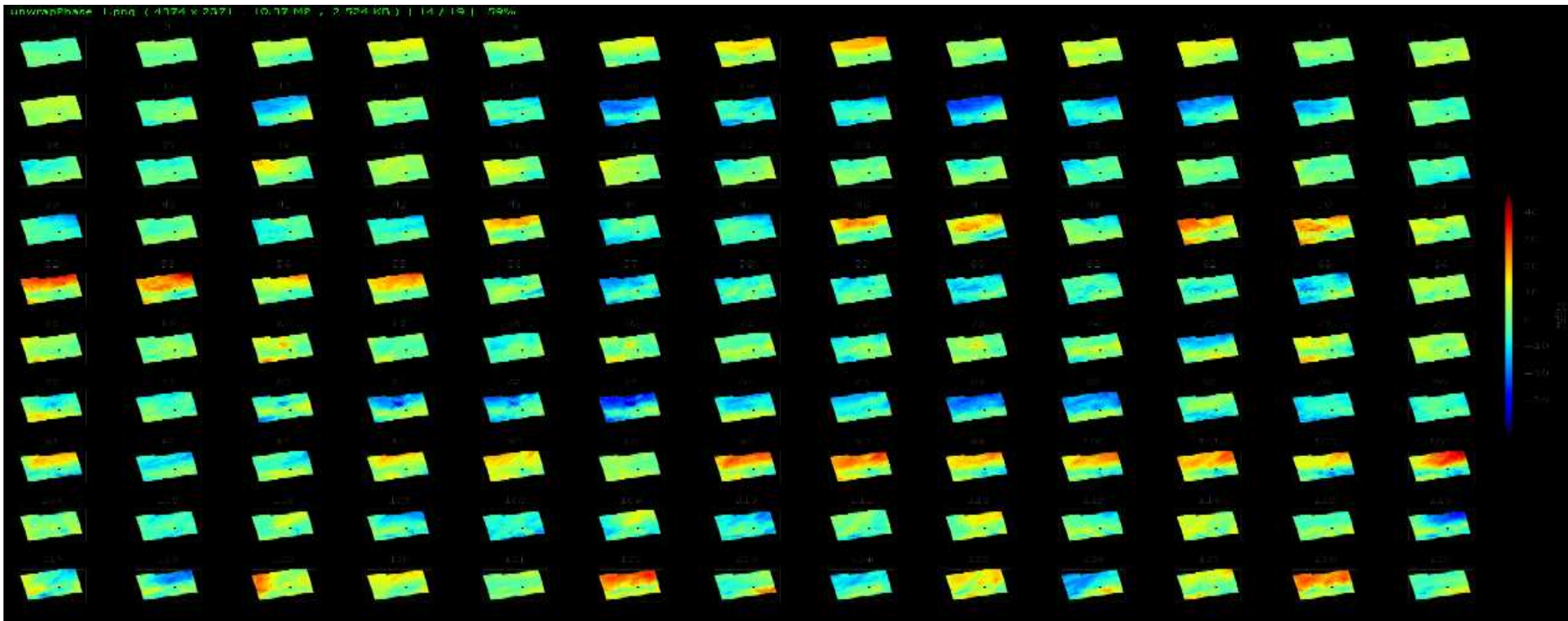


# Постановка задачи



- 1) Будем считать, что сплошной лесной подрост при усреднении образует поверхность, которая имеет одинаковые фазовые центры рассеяния;
- 2) Для измерений будем использовать изображения интерферометрической фазы с пространственным разрешением 40 м, полученные при расчетах на облаке ASF.

# Используемые данные



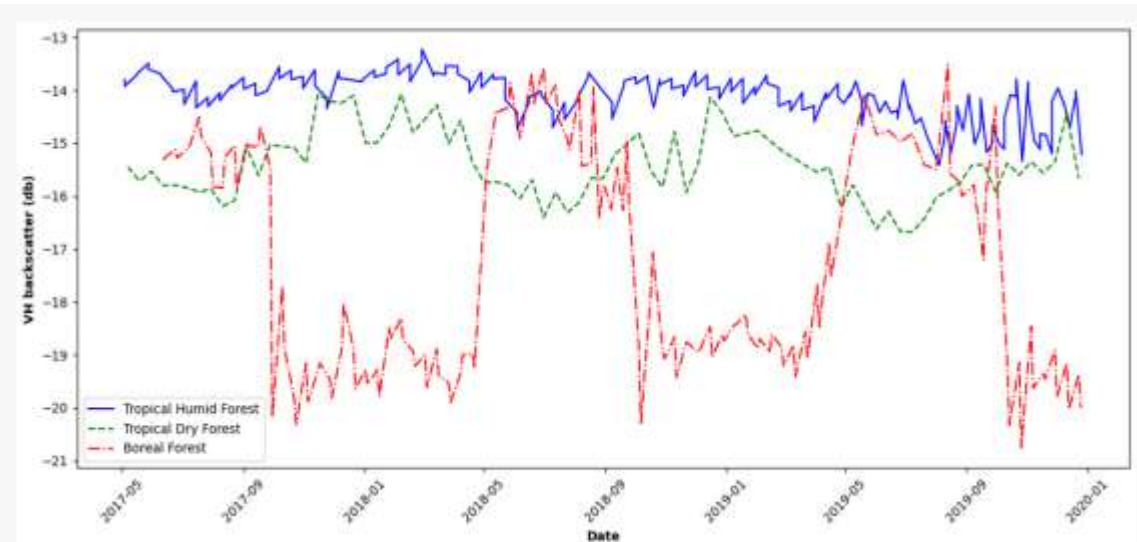
Первоначально для расчетов были использованы все доступные данные (независимо от сезона) с 2014 по 2021 г.: **344** интерферограммы радиолокатора Sentinel-1B с временной базой 12, 24 и 36 дней на нисходящей орбите на согласованной вертикальной поляризации.

| Год            | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | Итого |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Кол-во интерф. | 15   | 15   | 30   | 79   | 83   | 42   | 29   | 51   | 344   |



# Подбор данных

Сезонные вариации обратного рассеяния  
Sentinel-1



Mullissa, A.; Saatchi, S.; Dalagnol, R.; Erickson, T.; Provost, N.; Osborn, F.; Ashary, A.; Moon, V.; Melling, D. LUCA: A Sentinel-1 SAR-Based Global Forest Land Use Change Alert. *Remote Sens.* **2024**, *16*, 2151. <https://doi.org/10.3390/rs16122151>

- Для учёта сезонных эффектов (снежный покров, суточные переходы от положительных температур к отрицательным и обратно) выбраны данные с мая по сентябрь включительно.
- Для нивелирования временной декорреляции (изменение влажности или структуры из-за сильного ветра, неучтенное влияние атмосферы) использованы данные со средней когерентностью по всему тестовому полигону не менее 0,5.

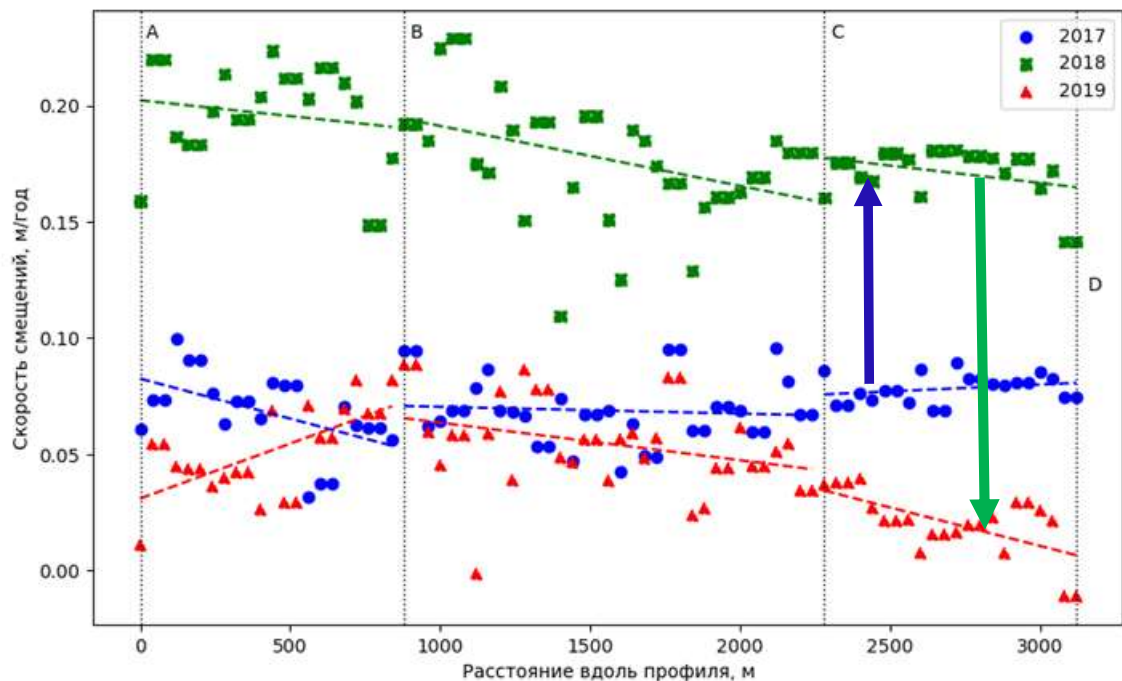
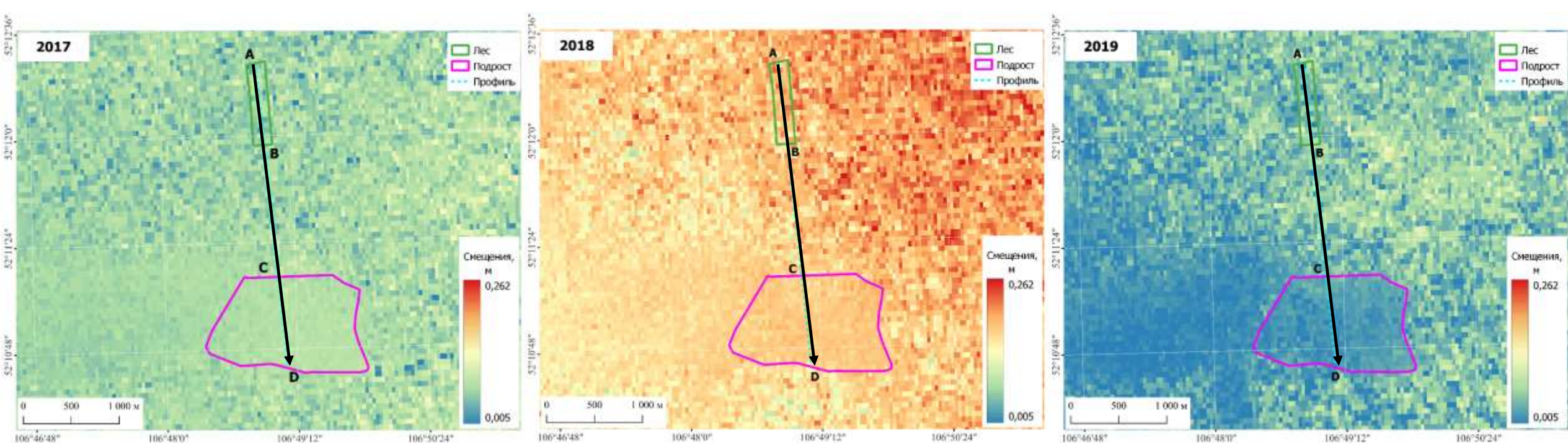
В итоге всем выше перечисленным критериям и с учетом размера временной базовой линии (не более 36 дней) соответствовали:

**16 интерферограмм 2017 г.,  
17 интерферограмм 2018 г. и  
15 за 2019 гг.**

# Тестовый участок залесения на веб-ресурсе Google Earth







максимальный прирост до 20 см/год в вегетационный период 2018 г. и практически равные величины в 2017 и 2019 гг. порядка 3-8 см/год, что связано с количеством осадков: 2017 г.- 4.58 см; **в 2018 г. – 5.62 см;** в 2019 г. – 4.67 см. Это согласуется с данными (Васильев и др. 2020): корреляция прироста сосны с количеством осадков мая–июля составляет  $r = 0.78$ .

Васильев Д.Ю., Кучеров С.Е., Семенов В.А., Чибилёв А.А. Реконструкция атмосферных осадков по радиальному приросту сосны обыкновенной на Южном Урале. // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 490. № 1. С. 37-42. <https://doi.org/10.31857/S2686739720010119>



Таким образом, показана принципиальная возможность дистанционных измерений скорости изменения высоты сплошного лесного полога. Методика может быть использована также для мониторинга биомассы леса. Например в рамках методологии REDD (Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation in developing countries) показано, что **увеличение биомассы на 14.9 т/га соответствует увеличению на 1 метр средней интерферометрической высоты леса** по данным радиолокаторов X-диапазона TerraSAR-X/TanDEM-X.

Solberg S., Næsset E., Gobakken T., Bollandsås O-M. Forest biomass change estimated from height change in interferometric SAR height models. // Carbon Balance Manage. 2014. V. 9, No. 5. <https://doi.org/10.1186/s13021-014-0005-2>