



Двадцать вторая международная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" ИКИ РАН 11 – 15 ноября 2024

# Интерпретация смещений западного склона вулкана Шивелуч в период извержения 11.04.2023, определенных методами спутниковой радарной интерферометрии

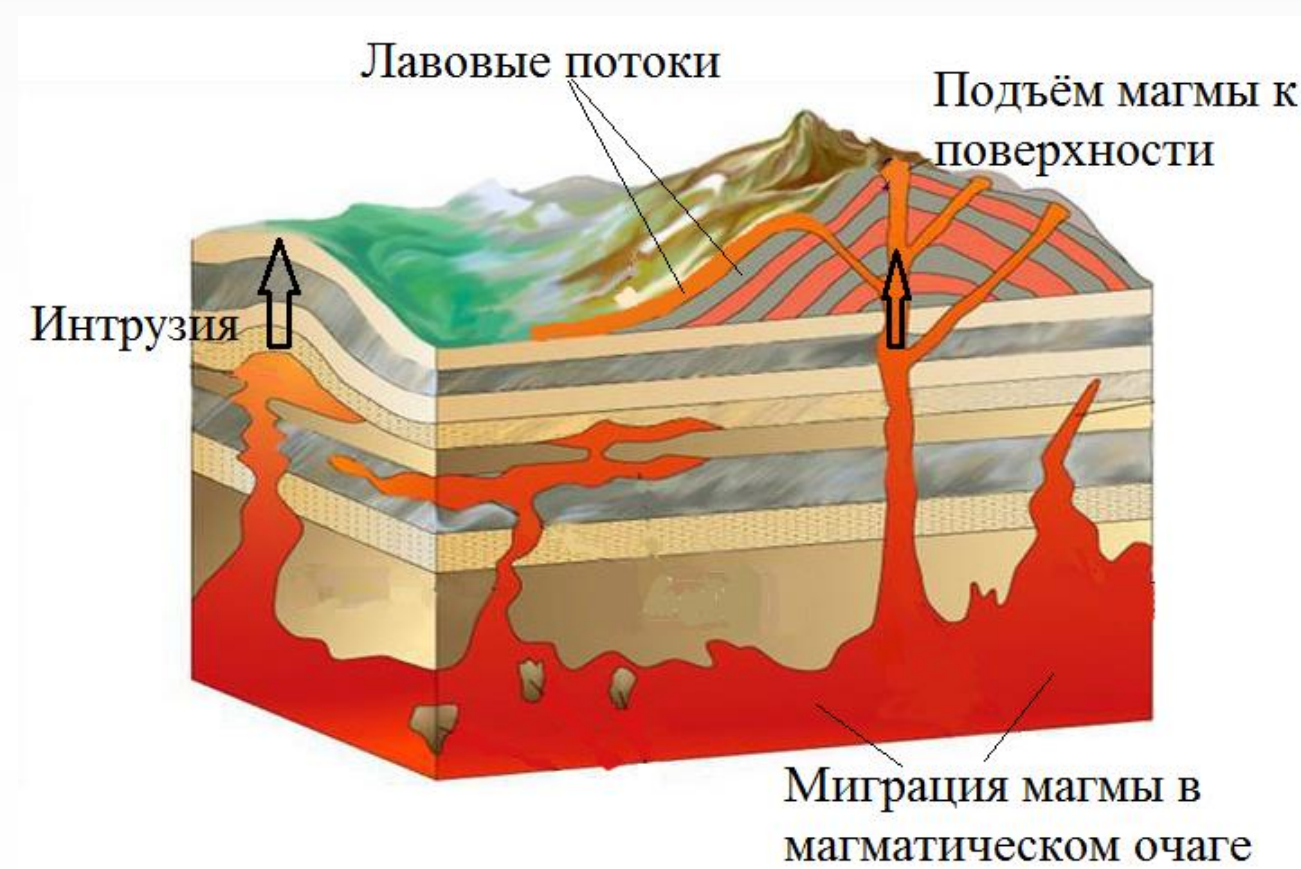
*Волкова М.С.<sup>1</sup> (с.н.с., к.ф.-м.н.), Михайлов В.О.<sup>1</sup> (зав. лаб., чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор), Горбач Н.В.<sup>2</sup> (с.н.с., к.г.-м.н.)*

*1) ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия*

*2) ИВиС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*

# Изучение вулканов с помощью спутниковой радарной интерферометрии

Типы вулканических процессов, которые можно обнаружить с помощью РСА (радар с синтезированной апертурой)



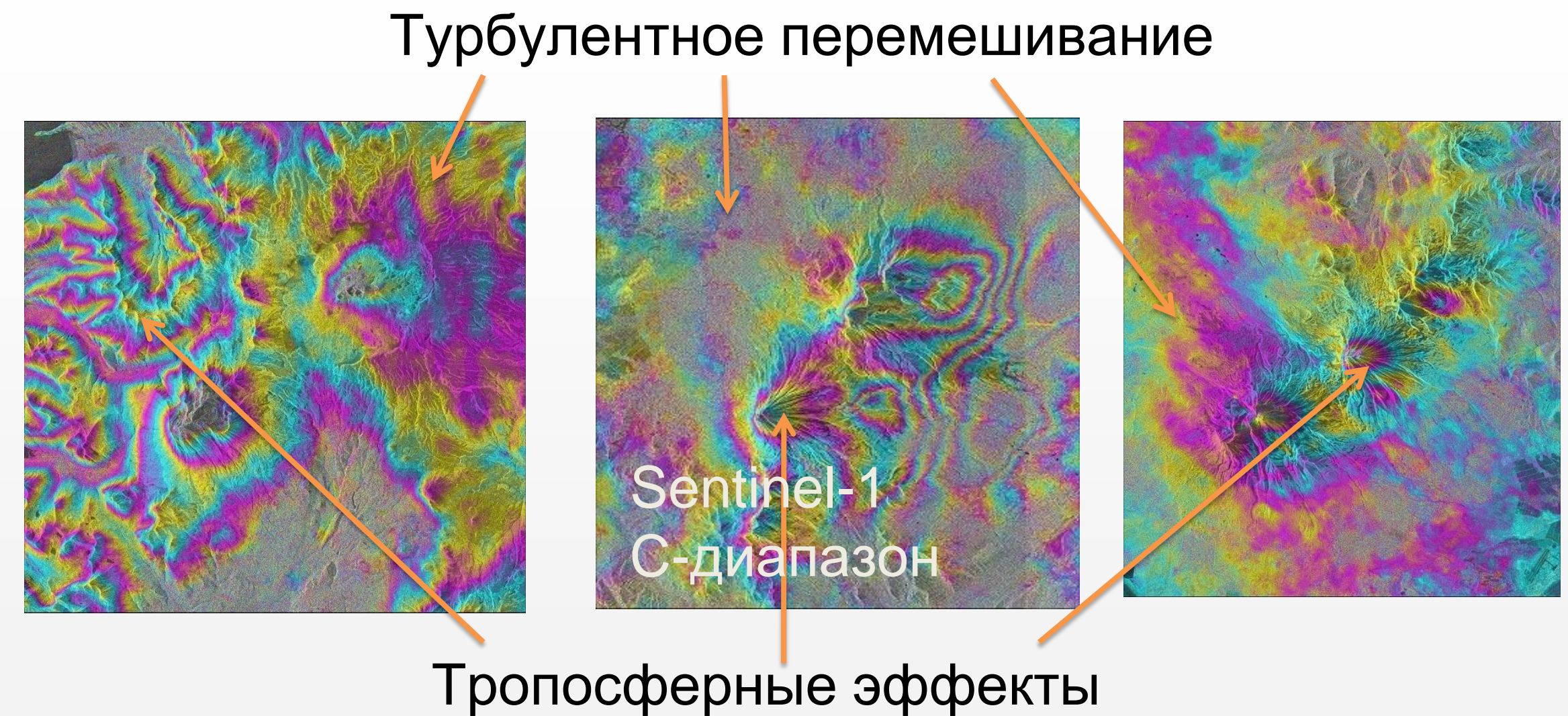
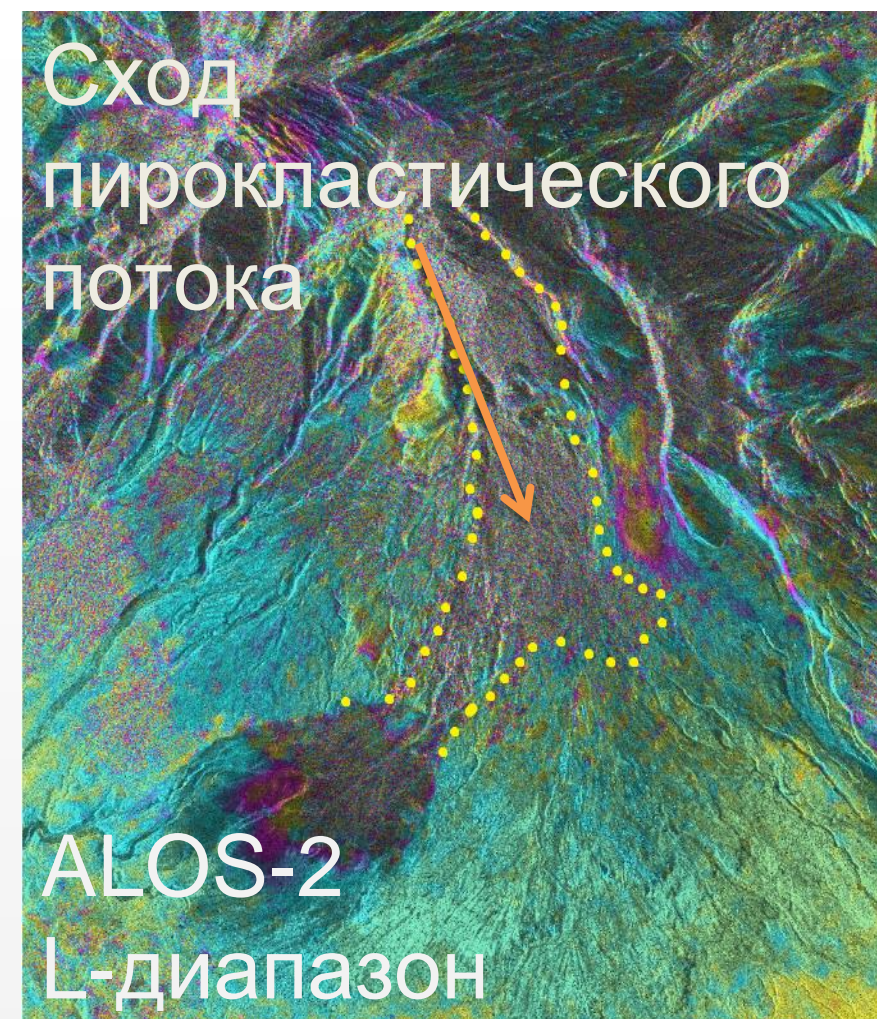
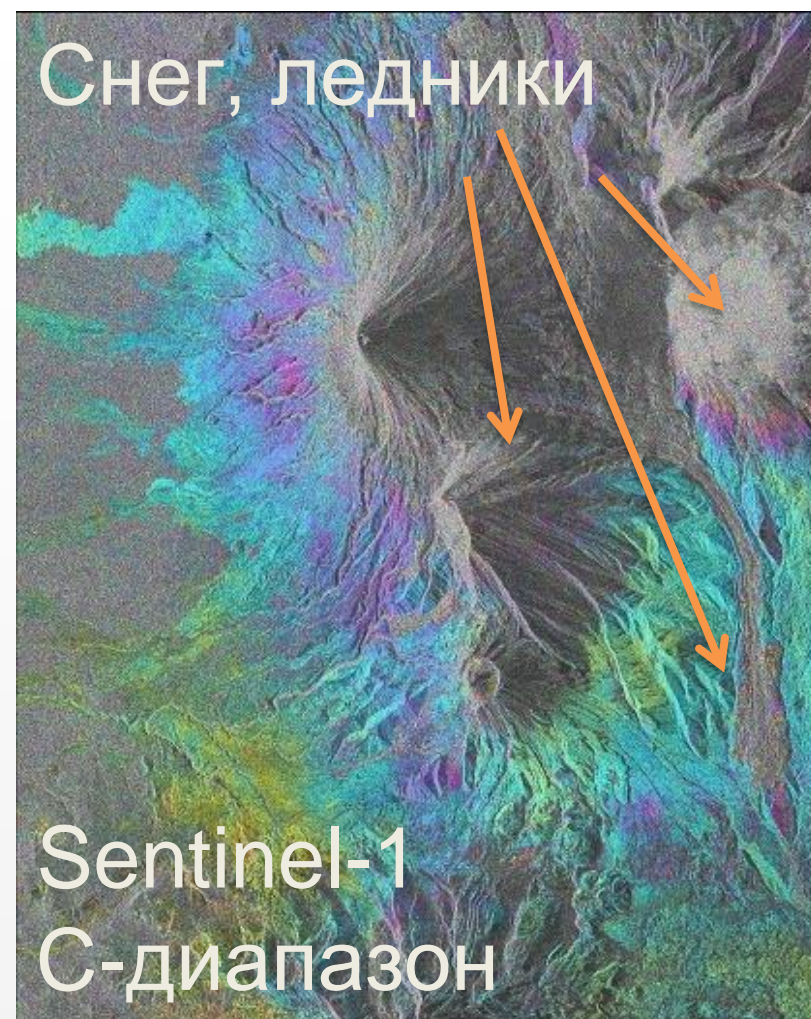
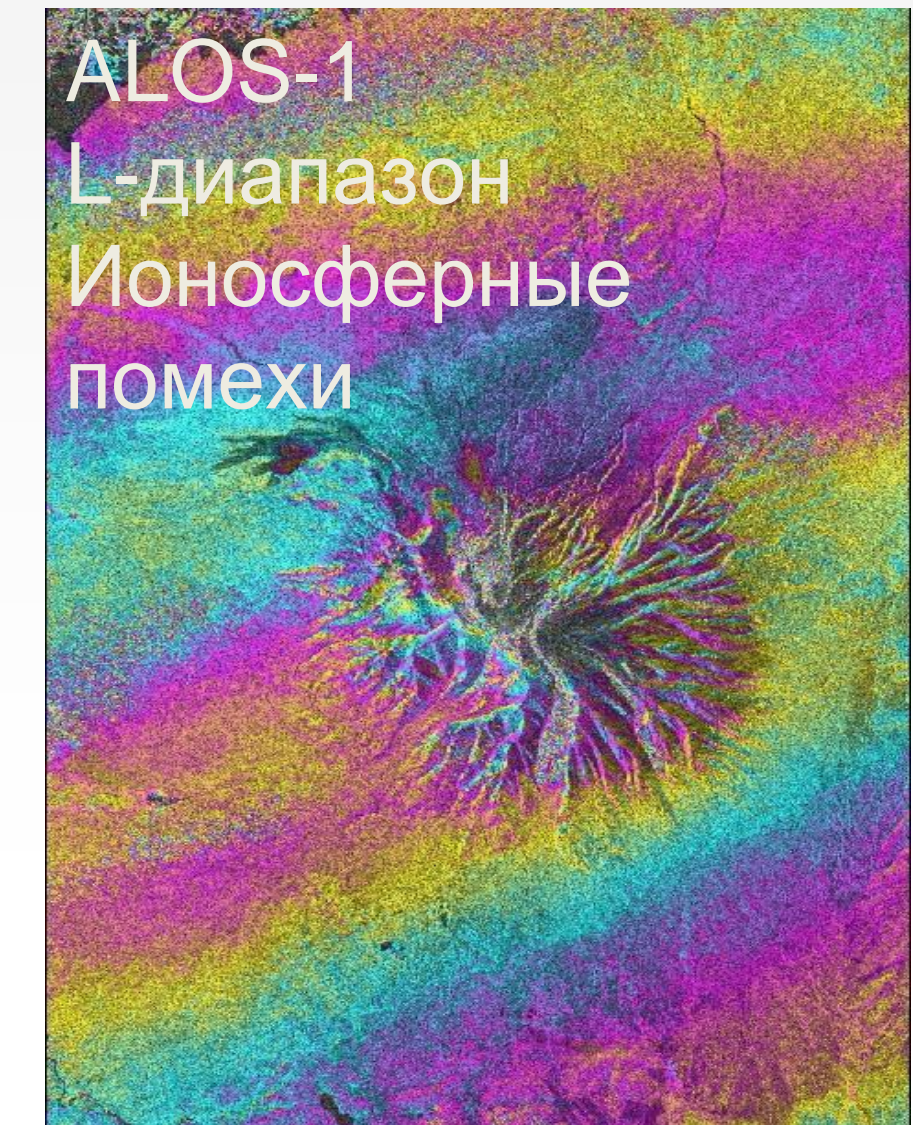
- Подъём или оседание склонов вулкана (миграция магмы из магматического очага)
- Интрузии (внедрение даек, силлов и т.д.)
- Процессы на пирокластических и лавовых потоках (термическая усадка в процессе остывания, компакция, уплотнение среды, эрозионные процессы и т.д.....)
- ...

С применением РСА интерферометрии изучено более 500 вулканов по всему миру (Ebmeier et al., 2018).

## В таблице приведены работы по Камчатке

Вулкан	Описание	Спутник	Решение	Ссылка
Узон	Кальдера. Инфляция 15 см (с 2000 по 2003 гг).	RADARSAT-1	Модель трещины	Lundgren et al., 2006
Кизимен	Смещения склонов перед извержением 2010 г. Дайка	ENVISAT ALOS-1	Окада	Ji et al., 2013
Толбачик	Дайка	Cosmo-SkyMed Radarsat-2	Окада	Lundgren et al., 2015
Толбачик	Лавовое поле, 2012	TanDEM-X	картирование лавового поля, DEM	Kubanek et al., 2015; 2017
Толбачик	Лавовое поле, 2012	Sentinel-1A	Термическая модель	<b>Михайлов и др., 2020</b>
Карымский	Магматическая система (2000-2010)	ALOS-1, ALOS-2	Моги	Ji et al., 2018
Безымянный	Смещения в кратере (20.12.2017)	TerraSAR	Модель с тремя ортогональными диполями	Mania et al., 2019; 2021
Большая Удина	Сейсмичность 2017	ALOS-2	Моги	Сенюков и др., <b>2020</b>
Корякский	Дайка	ALOS-1	Окада	<b>Михайлов и др., 2021</b>
Шивелуч	Пирокластический поток (29.08.2019)	Sentinel-1A	Термомеханическая модель	Волкова, <b>Михайлов, 2022</b> ; Волкова, <b>Михайлов</b> , Османов, <b>2023</b>
Шивелуч	Интрузия, западный склон (11.04.2023)	Sentinel-1A	3D модель с ортогональными дислокациями	Волкова, <b>Михайлов</b> , Горбач, <b>2024</b>

# Изучение вулканов с помощью спутниковой радарной интерферометрии. Проблемы

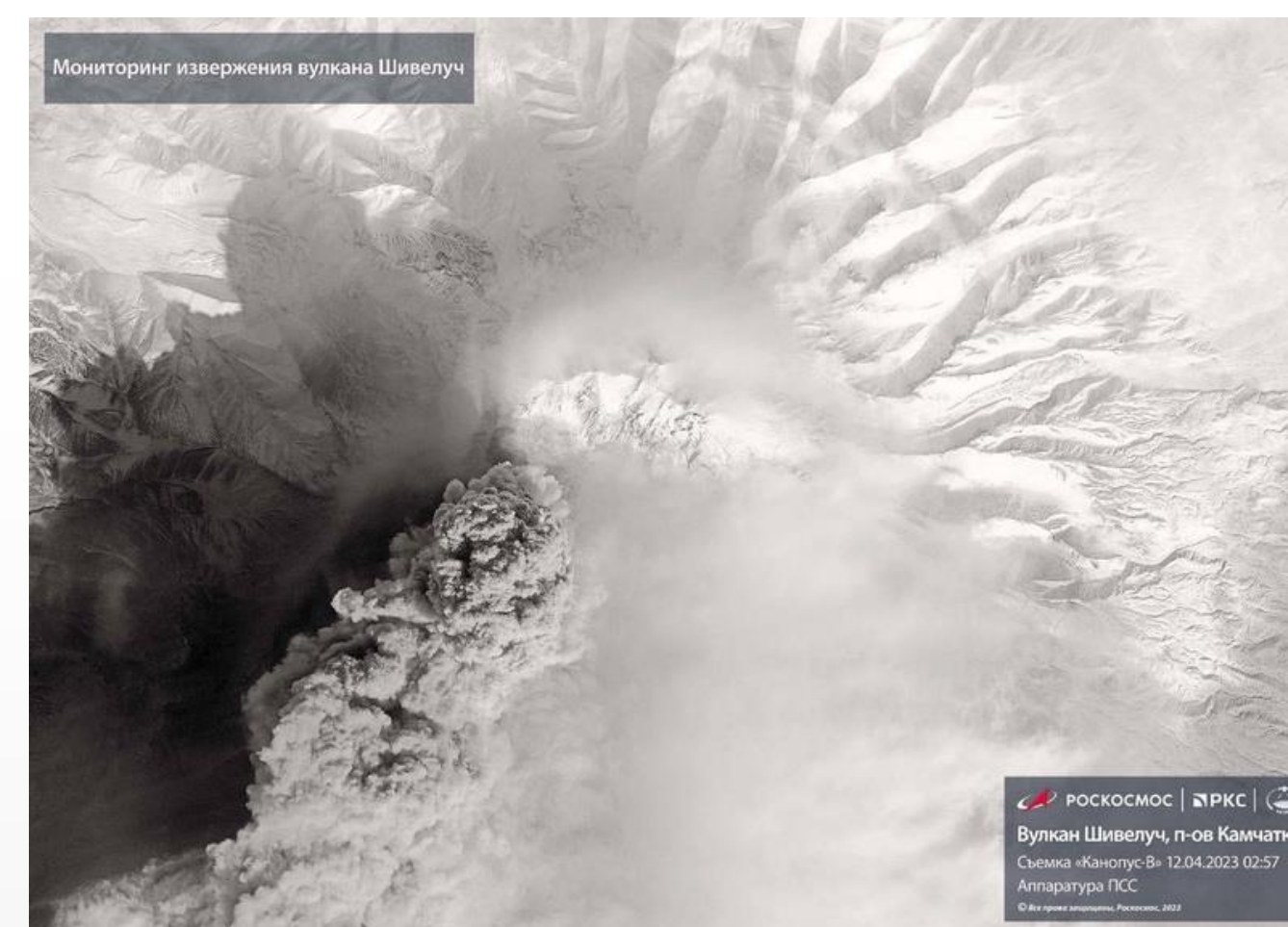
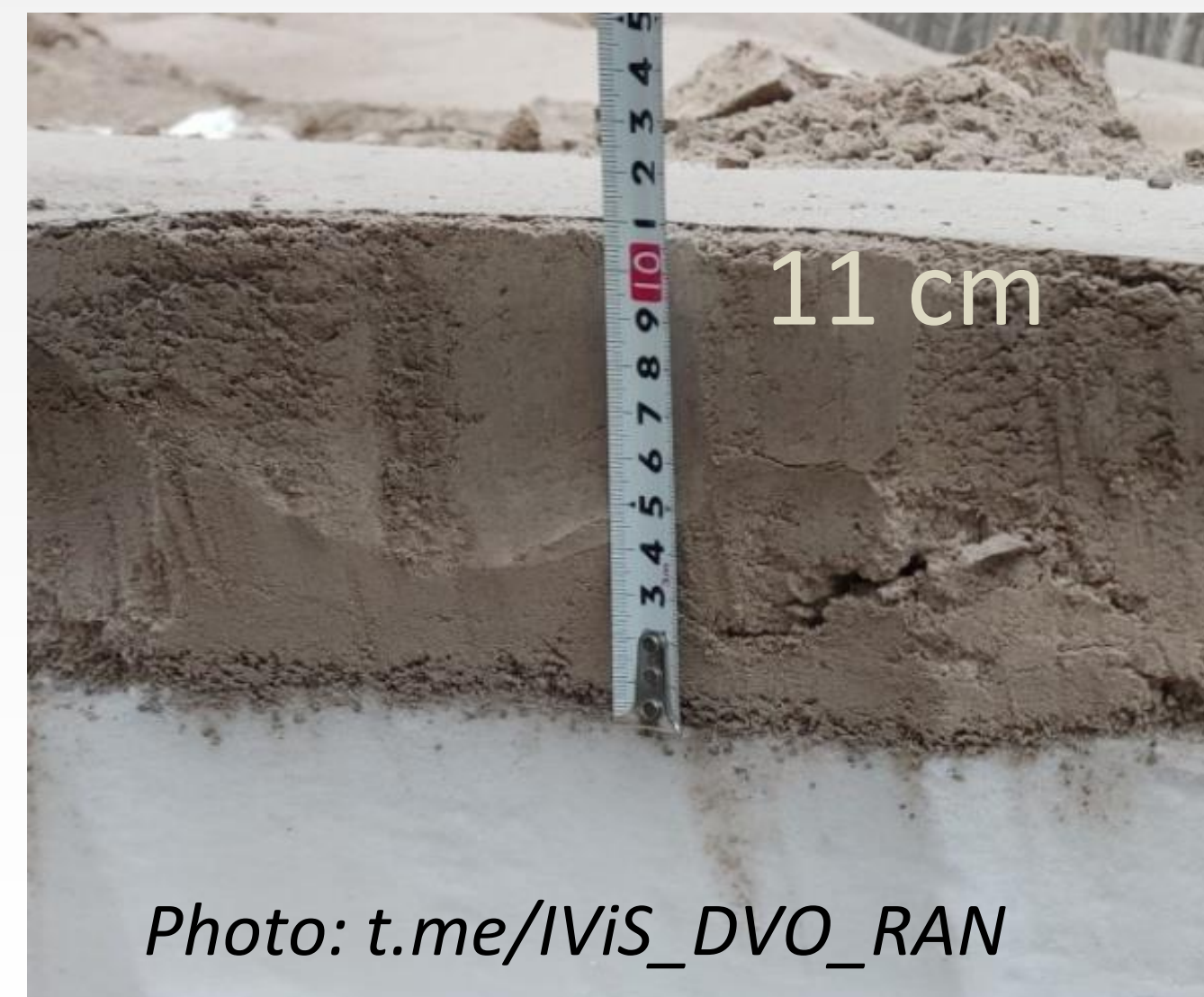


## Извержение вулкана Шивелуч 11.04.2023

Мощное извержение вулкана, которое произошло с 10 по 13 апреля 2023, было сильнейшим за последние 60 лет.

Эруптивная колонна достигла стратосферы, поднявшись на высоту 15-20 км.

Пирокластические потоки распространились на 19 км от эруптивного центра. Мощность выпавшего пепла в н.п. Ключи достигла 8 см.



Изображение, выполненное спутником Канопус-В (Россия), 12 апреля 2023, 02:57

# Данные и методы



## 1. Интерферометрические пары

1	01.05-13.05.2023	7	12.07-24.07.2023
2	13.05-25.05.2023	8	24.07-05.08.2023
3	25.05-06.06.2023	9	05.08-17.08.2023
4	06.06-18.06.2023	10	17.08-29.08.2023
5	18.06-30.06.2023	11	29.08-10.09.2023
6	30.06-12.07.2023	12	10.09-22.09.2023

## 2. GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR), Yu et al., (2017a, 2017b, 2018) [www.gacos.net](http://www.gacos.net)

Пространственное и временное разрешение модели **HRES (High RESolution)**:

По горизонтали:  $0,125^\circ$  (~12-14 км),

По вертикали: 137 уровней давления,

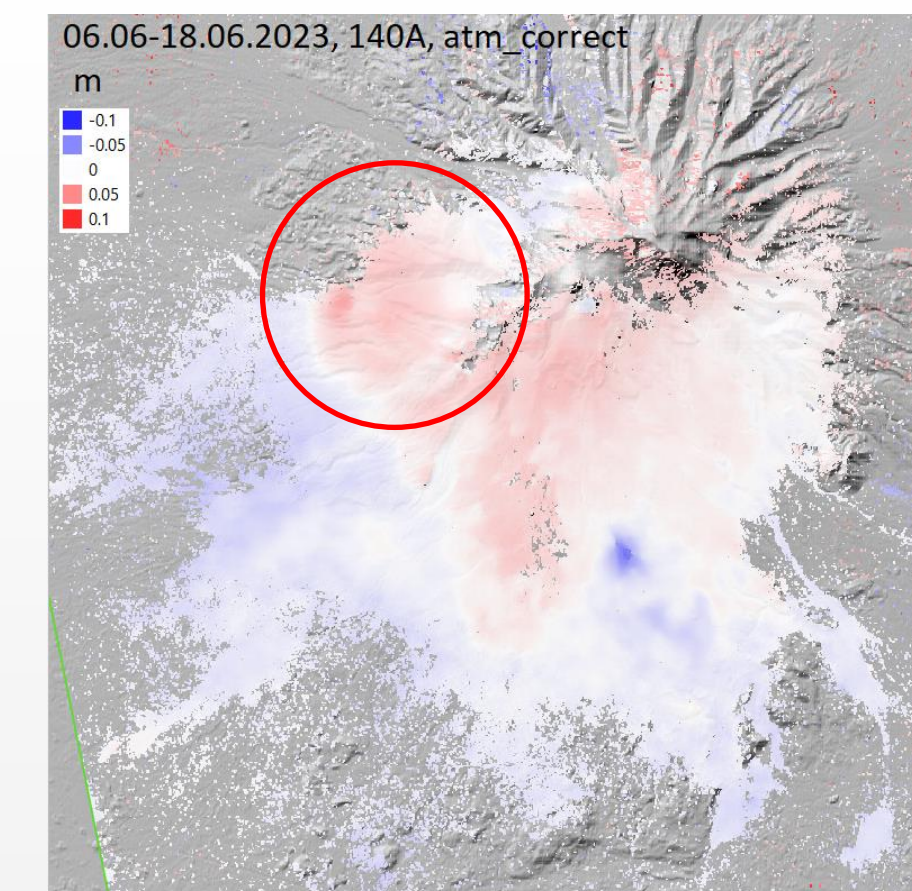
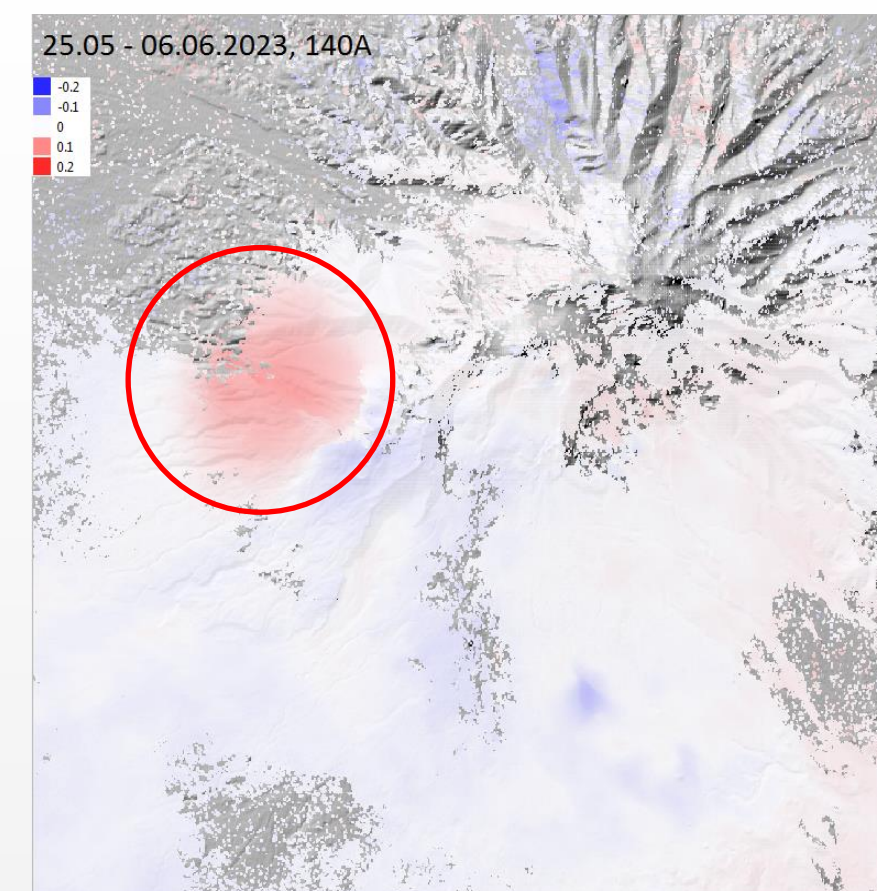
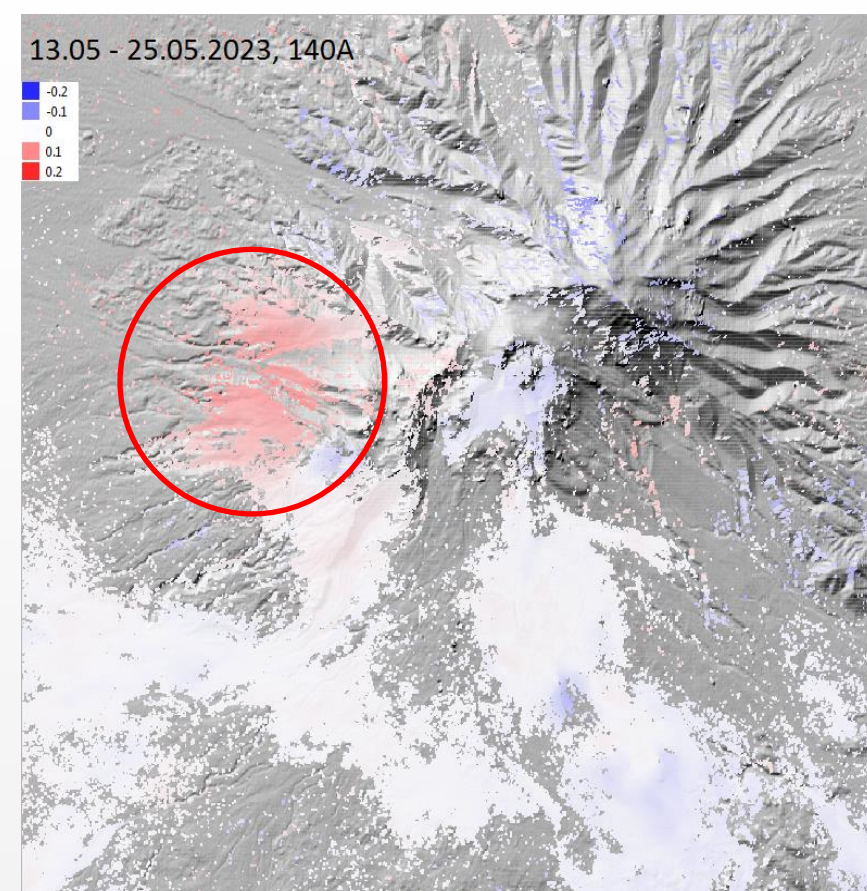
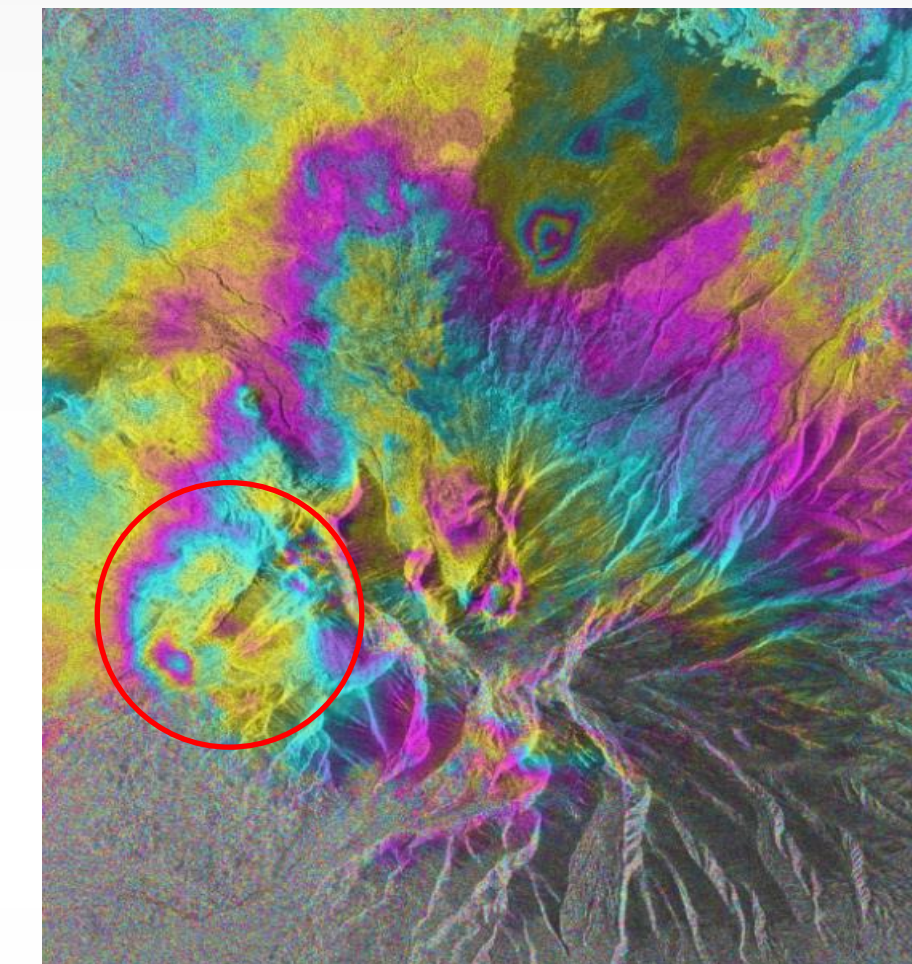
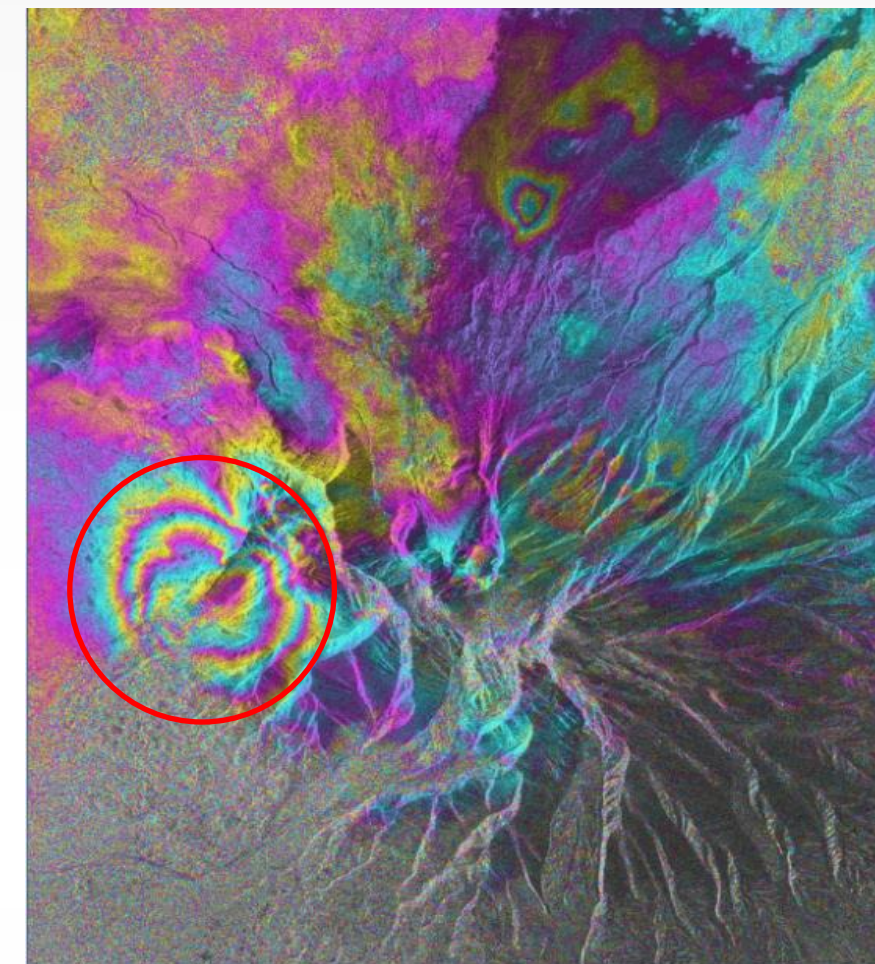
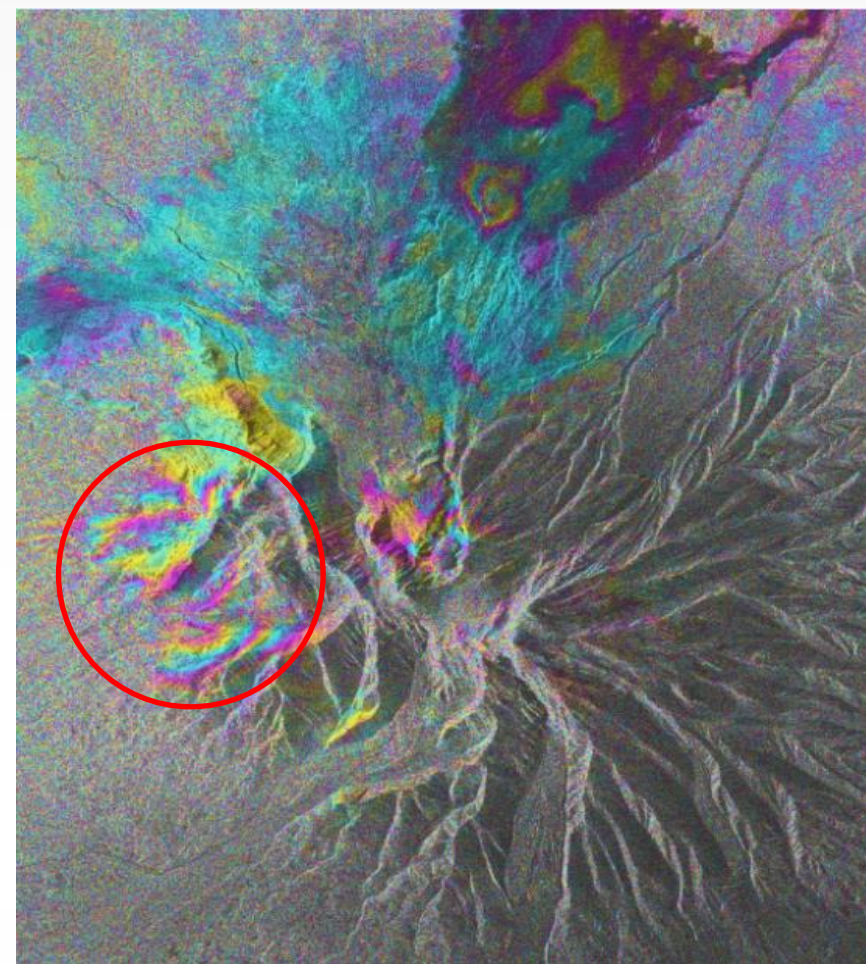
По времени: 6 часов.

06.06-18.06.2023 (26.8%), 18.06-30.06.2023 (26.5%), 12.07-24.07.2023 (21.5%), 24.07-05.08.2023 (12.1%), 05.08-17.08.2023 (41.6%), 17.08-29.08.2023 (40.9%), 29.08-10.09.2023 (19.8%)

$$3. Disp = \sum InterferogramDInSAR(i), i=1,..9$$

# Деформации западного склона вулкана по InSAR данным

Наиболее интенсивные поднятия на западном склоне вулкана нарастали в постпароксизмальную фазу извержения

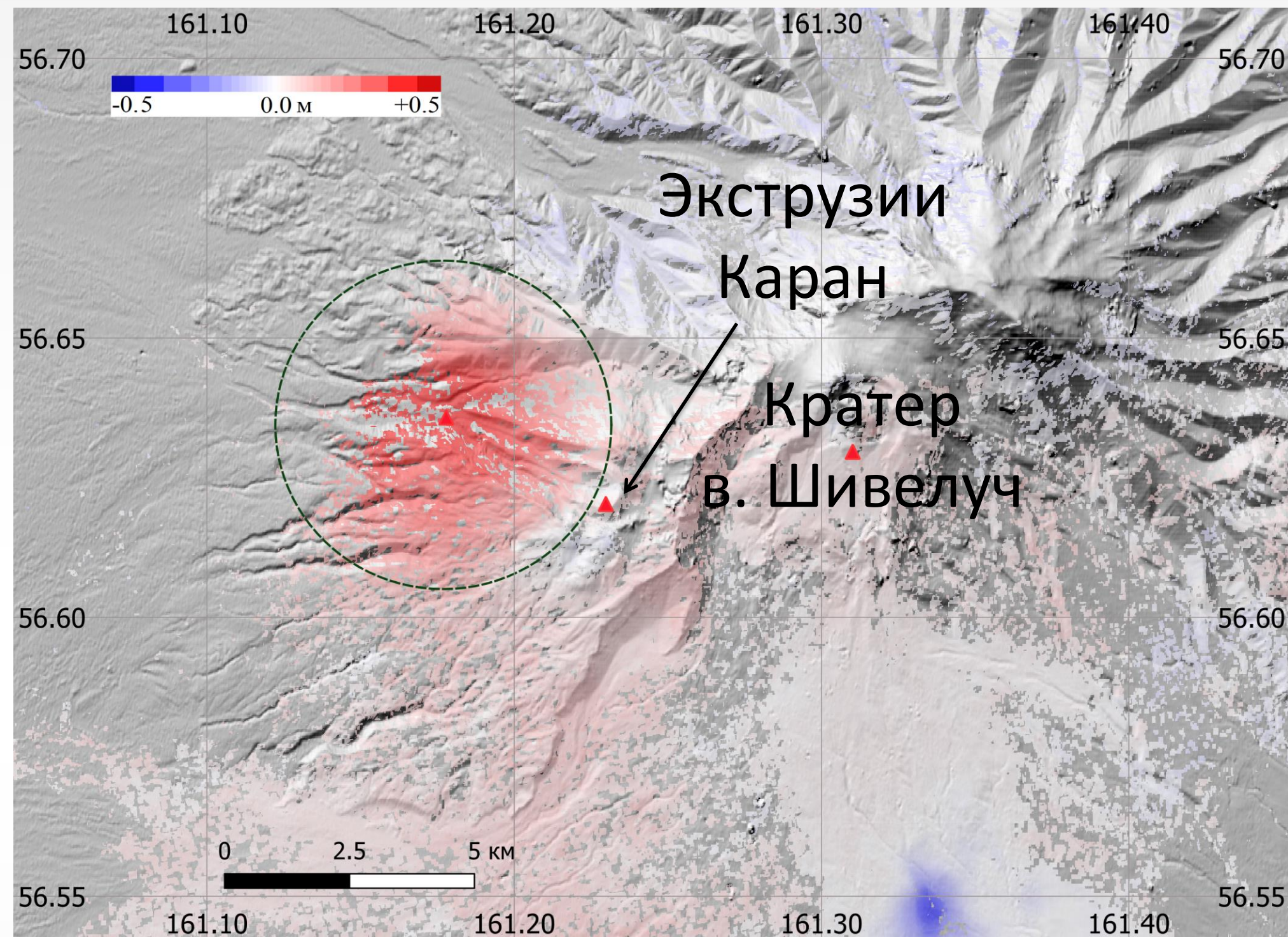


13.05-25.05.2023

25.05-06.06.2023

06.06-18.06.2023

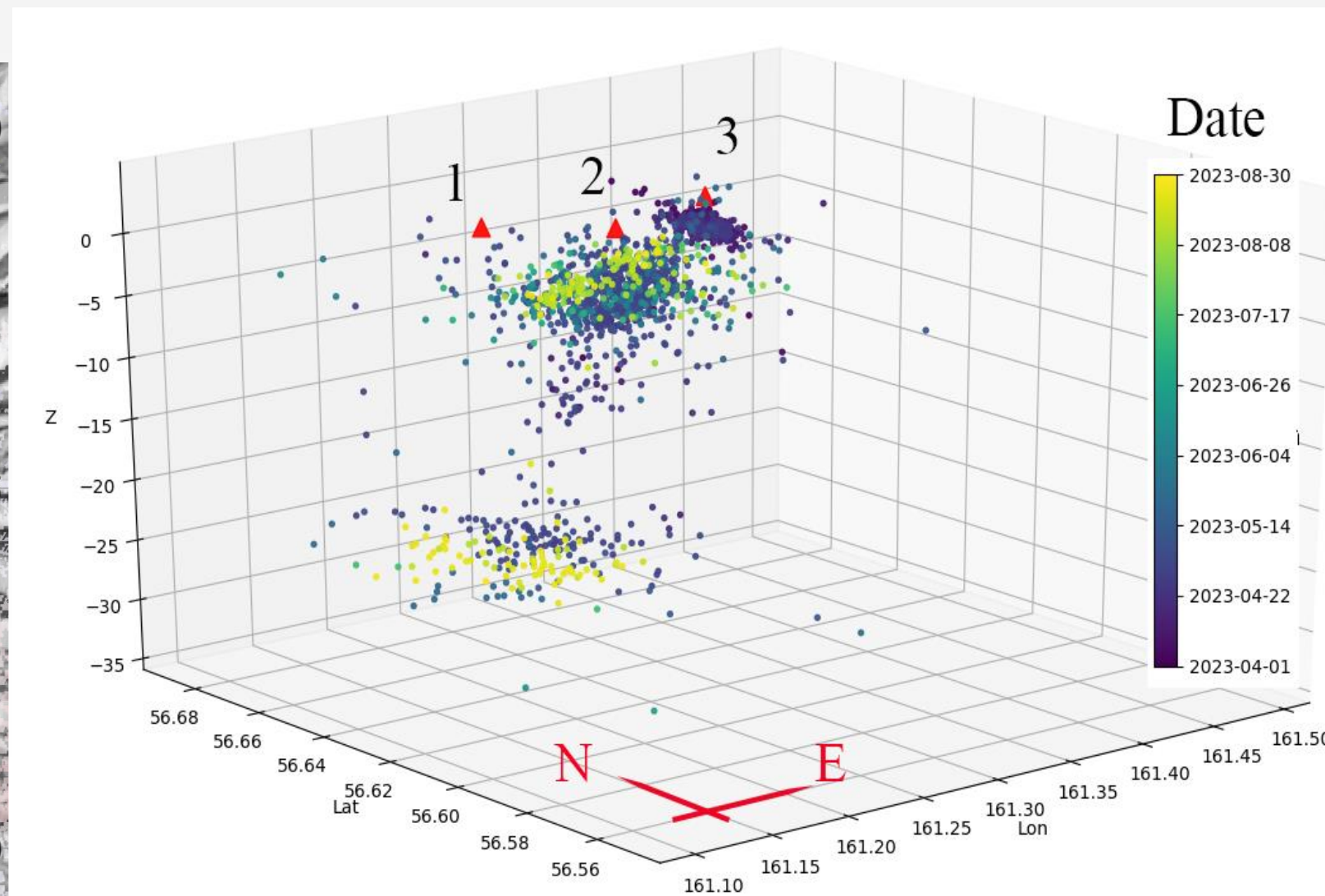
# Деформации западного склона вулкана по InSAR данным



**Суммарные смещения  $U_{LOS}$  (м)** за период 01.05–17.08.2023.

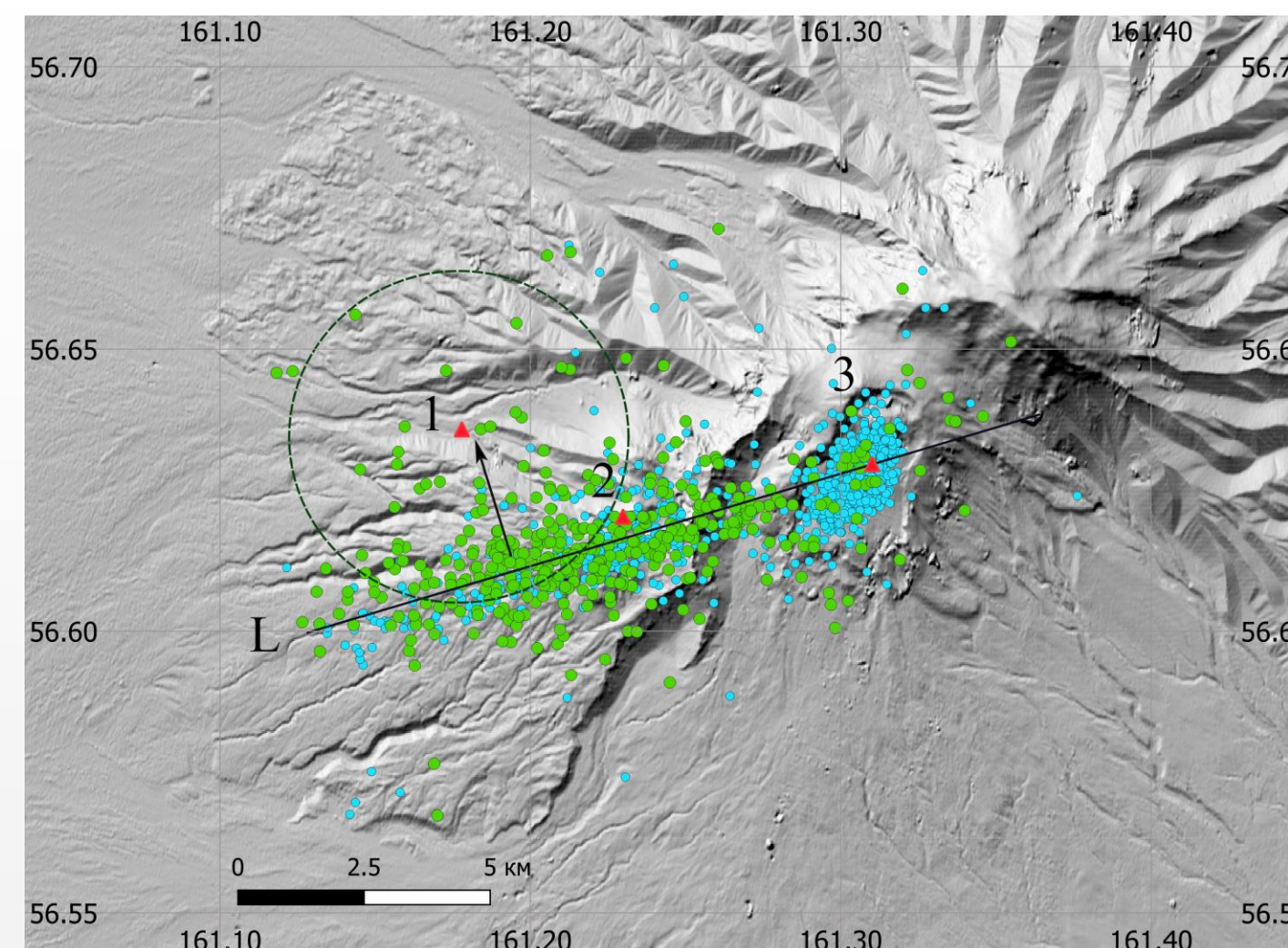
Круглая область – наиболее интенсивные смещения по InSAR.

Треугольниками показаны активный кратер Шивелуч и экструзии группы Каран.



Глубина и время распределения гипоцентров в период 01.04 – 31.08.2023.

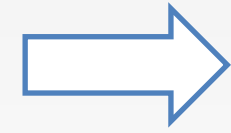
Цифрами обозначены:  
1 – центр области смещений,  
2 – экструзии Каран,  
3 – кратер вулкана



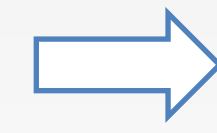
Распределение эпицентров. Апрель–май, 2023, глубина < 15 km. Синие точки – апрель. Зелёные точки – май.

# Интерпретация смещений

Могі модель  
(1958)



McTigue  
(1987)  
 $\Delta P a^3 = G \Delta V / \pi$



Bonafede, Ferrari  
(2009)  
 $\Delta V = Ah \frac{3K}{K+G^4/3}$

$$U_x = (1 - \nu) \frac{\Delta P a^3}{G} \frac{(\xi - x)}{R^3}$$

$$U_y = (1 - \nu) \frac{\Delta P a^3}{G} \frac{(\eta - y)}{R^3}$$

$$U_z = (1 - \nu) \frac{\Delta P a^3}{G} \frac{(d - z)}{R^3}$$

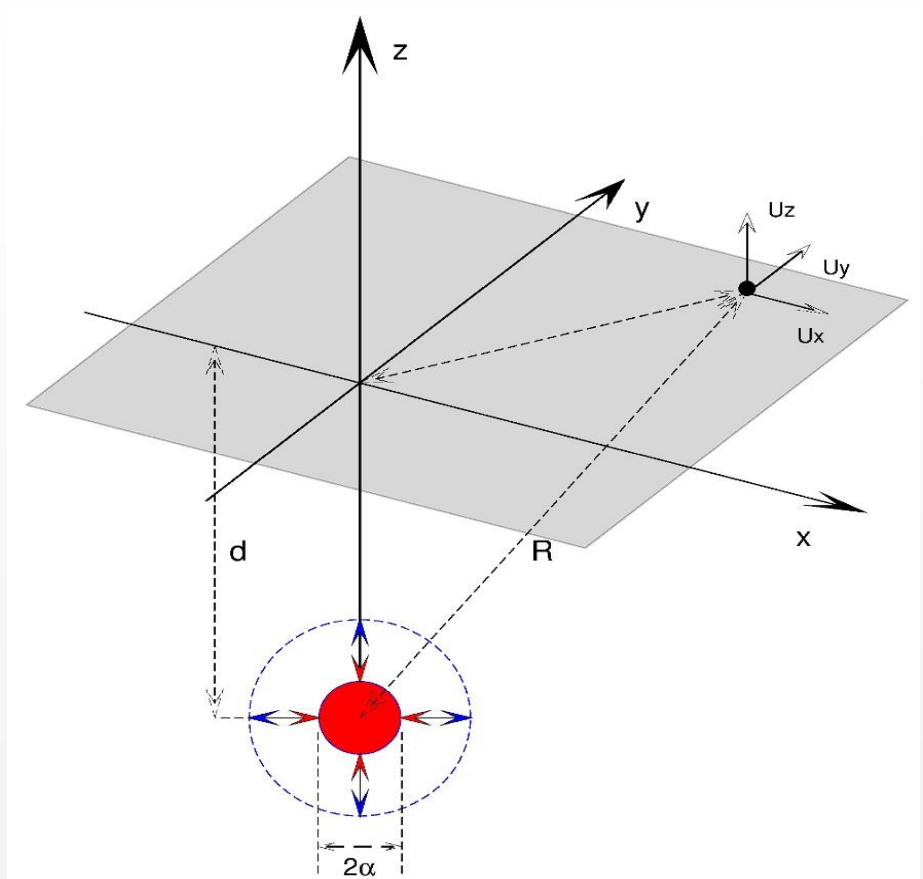
$$e = a/d \ll 1$$

$\Delta P$  – изменение давления  
 $a$  - радиус сферического источника  
 $K$  – модуль всестороннего сжатия  
 $G$  – модуль сдвига  
 $R$  – расстояние до источника  
 $d$  – глубина источника  
 $\nu = 0.25$  Пуассон

$$U_x = \frac{(1-\nu)(\xi-x)}{\pi R^3} \Delta V$$

$$U_y = \frac{(1-\nu)(\eta-y)}{\pi R^3} \Delta V$$

$$U_z = \frac{(1-\nu)(d-z)}{\pi R^3} \Delta V$$



$$U_x = A \frac{5h}{4\pi} \frac{(\xi - x)}{R^3}$$

$$U_y = A \frac{5h}{4\pi} \frac{(\eta - y)}{R^3}$$

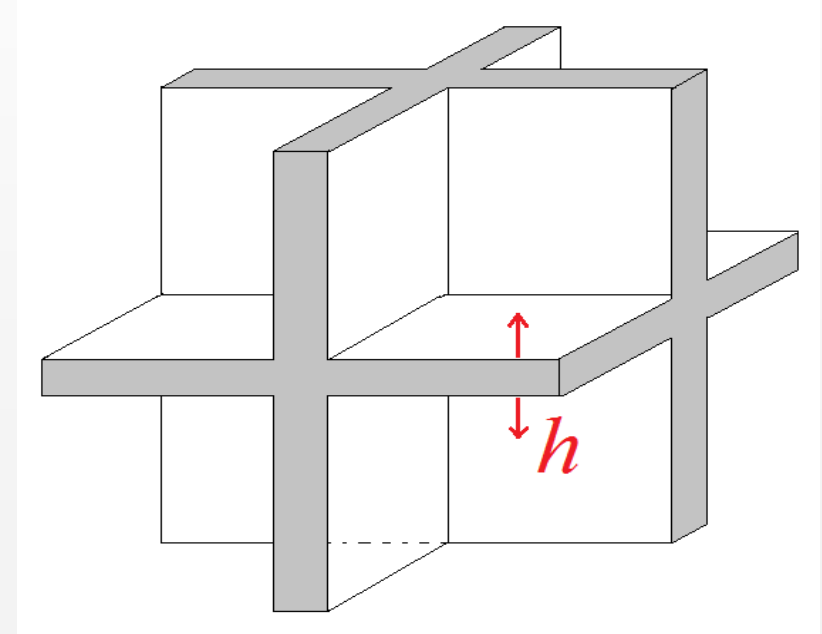
$$U_z = A \frac{5h}{4\pi} \frac{(d - z)}{R^3}$$

$$U_x = C [-\ln(R + (\eta - y))] \Big|_{\xi_1 \eta_1}^{\xi_2 \eta_2}$$

$$U_y = C [-\ln(R + (\xi - x))] \Big|_{\xi_1 \eta_1}^{\xi_2 \eta_2}$$

$$U_z = C \left[ \arctg \left( \frac{(\xi - x)(\eta - y)}{R(d - z)} \right) \right] \Big|_{\xi_1 \eta_1}^{\xi_2 \eta_2}$$

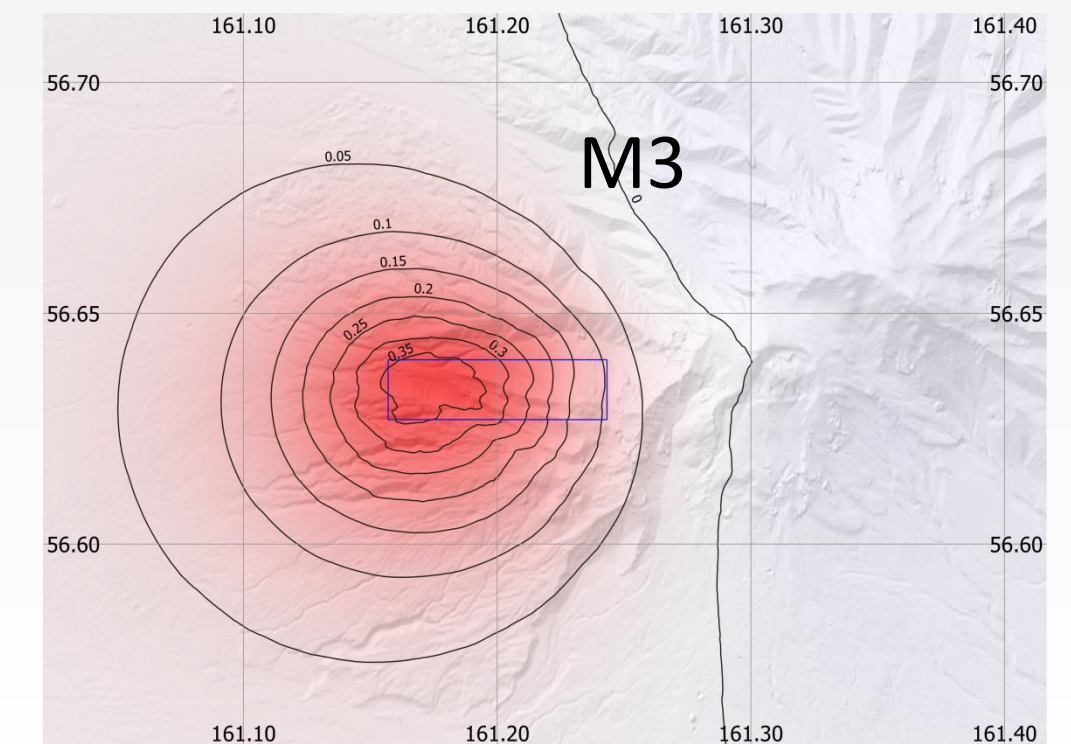
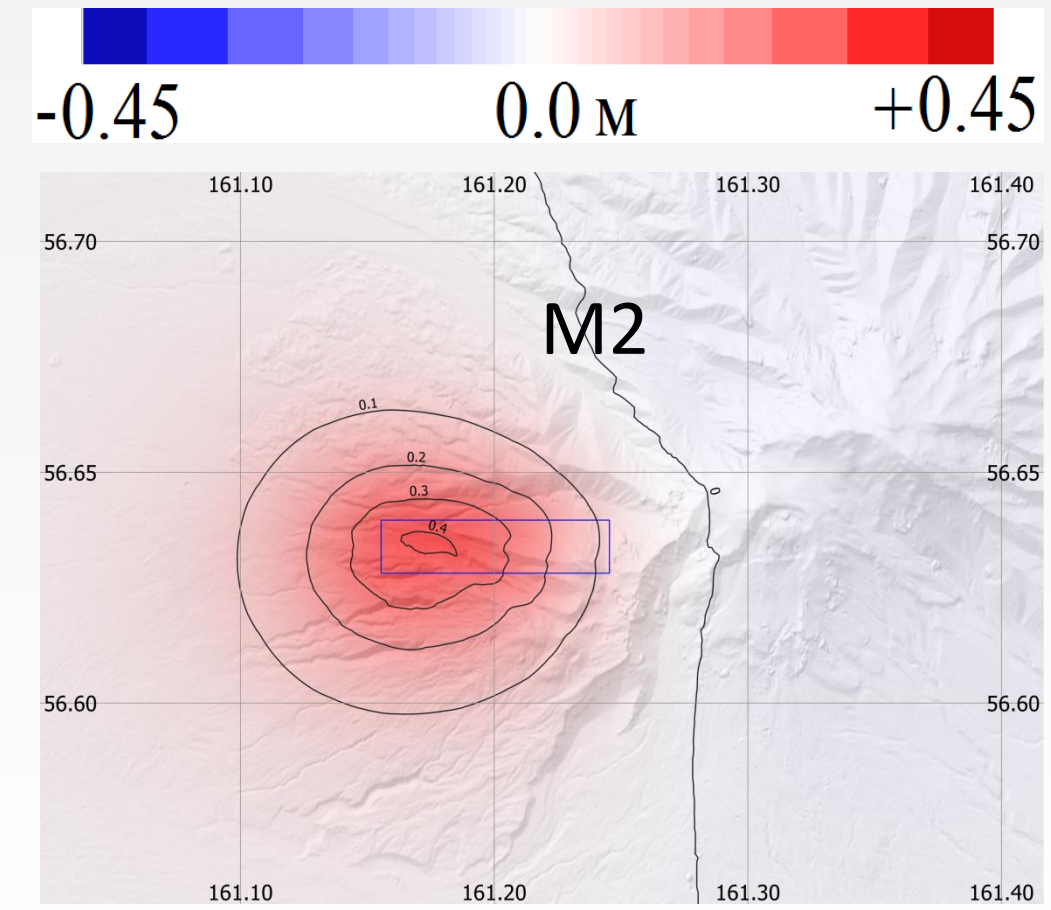
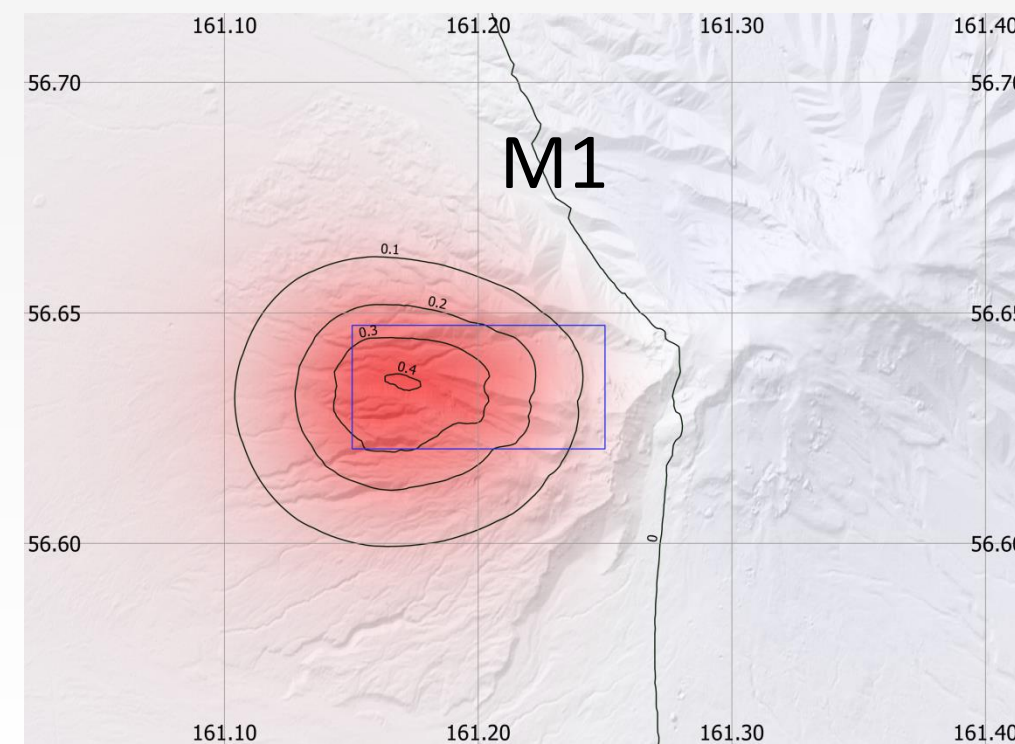
$A$  – дифференциал площади =  $dx dy$   
 $h$  – раскрытие дислокации  
 $C = \frac{5h}{4\pi}$



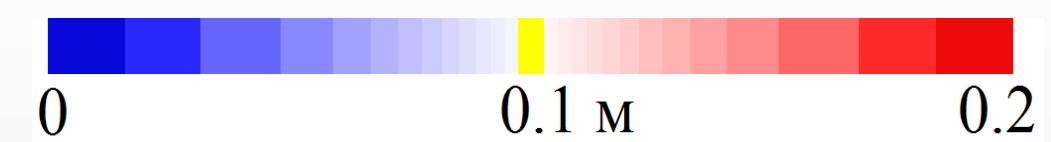
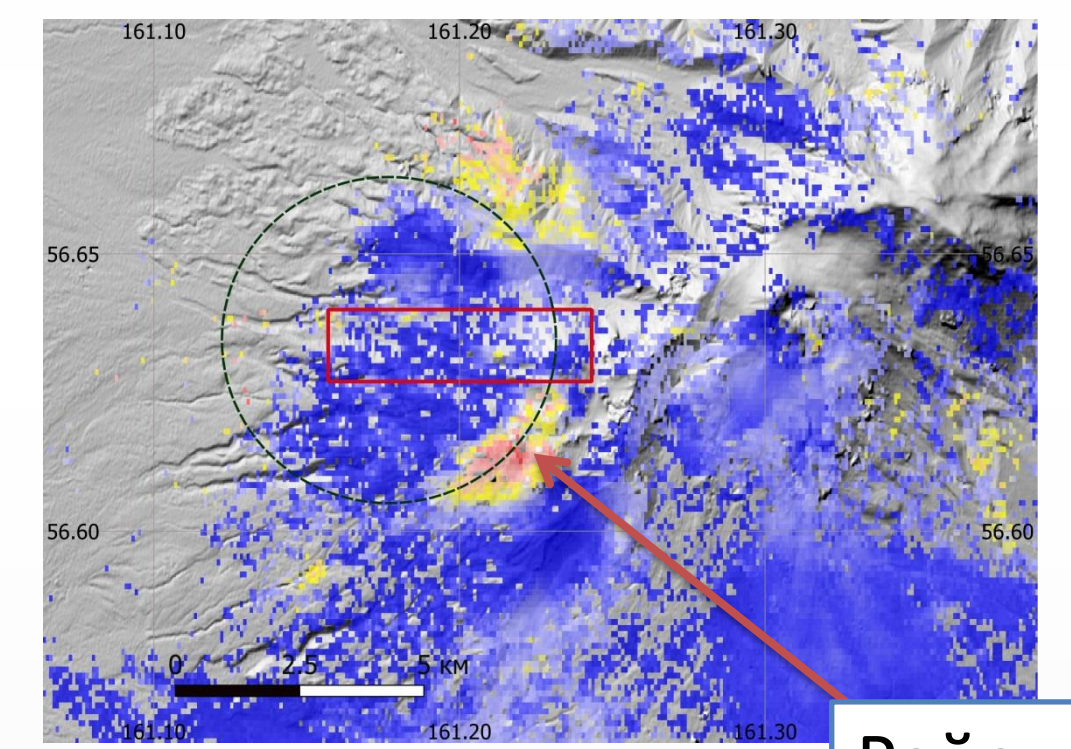
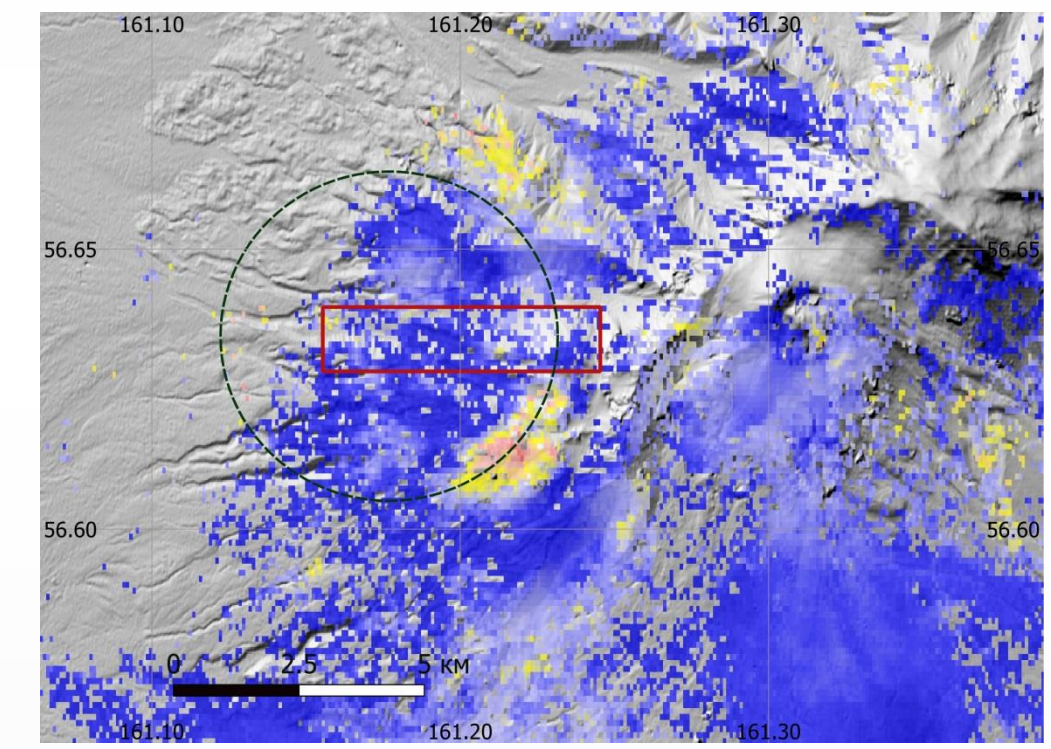
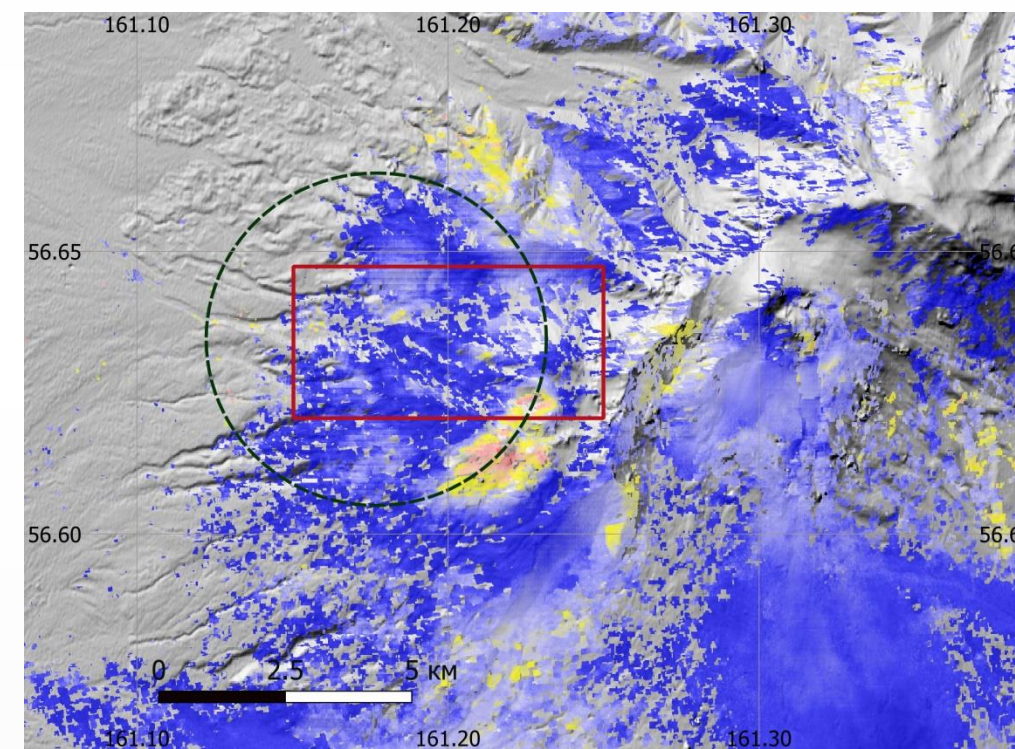
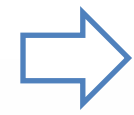


# Результаты моделирования

**Модели**  
(M1, M2, M3).  
Прямоугольники –  
проекции интрузии на  
горизонтальную  
плоскость



**Невязки** по моделям  
относительно  
смещений, полученных  
по РСА-данным ( $r \sim 2.7$   
см)



	Depth, km	L, km	W, km	H, m	V, km <sup>3</sup>
M1	1	6	3	0.5	0.0090
M2	1.5	5.55	1.25	1.5	0.0104
M3	2	5.25	1.4	1.75	0.0129

Район экстрезий  
Каран  
май – август,  
2023

## Заключение

**Радарная интерферометрия** мощный и эффективный инструмент для изучения различных процессов, вызывающих деформации земной поверхности.

На основе данных радарной интерферометрии и данных о распределении сейсмичности построена модель внедрения магматического расплава, которое происходило в постпароксизмальную фазу извержения 11.04.2023 под западным склоном вулкана Шивелуч.

Результаты модели подтверждают гипотезу о том, что магма поднялась с глубины ~25 км по образовавшейся под западным склоном вулкана трещине и внедрилась горизонтально под склон на глубине 1-2 км в северном – северо-западном направлении.

Размеры магматического тела меняются от 6.0x3.0 км на глубине 1 км, до 5.25x1.4 км на глубине 2 км, при этом его мощность составляет от 0.5 до 1.75 м, а объём от 0.009 до 0.0129 км<sup>3</sup>.

# Литература

Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нуждаев А.А., Бриль А.А., Озеров А.Ю., Крамарева Л.С., Сорокин А.А. Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: ИКИ РАН, 2023. Т. 20, № 2. С. 283-291. doi: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291

Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дроздина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Соболевская О.В. Предварительные результаты исследований сейсмичности в районе вулкана Шивелуч в 2022-2023 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. Труды Девятой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 24-30 сентября 2023 г, место издания КФ ФИЦ ЕГС РАН г. Петропавловск-Камчатский, с. 188-192.

Bonafede M., Ferrari C. Analytical models of deformation and residual gravity changes due to a Mogi source in a viscoelastic medium. Tectonophysics, 2009. 471(1-2), 4-13.

Ebmeier, S., Andrews, B.J., Araya, M., Arnold, D.W.D., Biggs, J., Cooper, C., Cottrell, E., Furtney, M., Hickey, J., Jay, J., Lloyd, R., Parker, A., Pritchard, M., Robertson, E., Venzke, E., Williamson, J.L. Synthesis of global satellite observations of magmatic and volcanic deformation: implications for volcano monitoring & the lateral extent of magmatic domains. Journal of Applied Volcanology. 7, 2, 2018. 10.1186/s13617-018-0071-3

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>

**Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-17-00064 ([https:// rscf.ru/project/23-17-00064](https://rscf.ru/project/23-17-00064)). Данные для выполнения исследований были получены в рамках госзадания ИВиС ДВО РАН.**