

Наблюдение деформации склонов вулкана Крашенинникова в ходе его извержения в августе 2025 года методами радиолокационной интерферометрии

А.И. Захаров, Л.Н.Захарова

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова
РАН

Россия, 141190, Московская область, г. Фрязино, пл. Введенского, д.1

E-mail: aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru

В результате обработки серии интерферометрических пар радиолокационных снимков спутников Sentinel-1, покрывающих интервал времени с конца июля по конец августа 2025 года, измерены мелкомасштабные смещения поверхности склонов вулкана Крашенинникова и описана их динамика, вызванная извержением лавы, которое началось 3 августа. Обнаружено, что активные процессы деформации поверхности начались за несколько дней до начала извержения, вскоре после землетрясения. По измерениям радиальных смещений поверхности склонов в сеансах съемки с восточного и западного направлений выделены вертикальная и горизонтальная (восток-запад) компоненты смещений. Измерения, охватывающие момент извержения вулкана, свидетельствуют о расширении жерла вулкана в горизонтальном направлении (восток-запад) на величину не менее 1.5 метра. Методом корреляционного анализа смещений деталей изображений РСА «Кондор-ФКА» №2 выявлена азимутальная составляющая смещений (север-юг), недоступная для интерферометрических измерений, что позволяет судить о предпочтительно радиальной модели расширения кальдеры вулкана
Ключевые слова: радиолокационная интерферометрия, вулкан Крашенинникова, измерение смещений поверхности, измерение сдвигов деталей изображения

Observation of the deformation of Krasheninnikov volcano slopes during the eruption in August 2025 using radar interferometry techniques

A.I. Zakharov, L.N.Zakharova

Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, RAS

To measure small-scale surface movements on the slopes of Krasheninnikov volcano and characterize their dynamics caused by the lava eruption that began on August 3, a series of Sentinel-1 SAR interferometric images spanning the period from late July to late August 2025 was used. It was found that the active surface deformations began several days before the eruption, shortly after the earthquake. Components of vertical and horizontal (east-west) displacements were extracted from combination of surface slant range displacements measured from eastern and western sides with respect to volcano. The level of the volcano vent expansion is at least 1.5 meters. Feature tracking technique applied to Kondor-FKA №2 SAR amplitude data revealed azimuthal (North-East) spread of the caldera, inaccessible to interferometry. The evidence of the North-East spread, in addition to East-West spread, confirms the predominantly radial model of the volcano expansion.

Keywords: radar interferometry, Krasheninnikov volcano, measurements of surface movements, feature tracking

Введение

Вулкан Крашенинникова на Камчатке — один из действующих современных вулканов, последнее свидетельство его извержения относится к XV веку. Новое извержение вулкана произошло 3 августа 2025 года, через несколько дней после крупного землетрясения 30 июля 2025 года магнитудой 8,8 у берегов Камчатки Для

наблюдения за процессом деформации поверхности вулканического комплекса в данной работе использованы методы космической радиолокационной интерферометрии, позволяющие измерять мелкомасштабные смещения отражающей поверхности за время между съемками интерферометрической пары снимков. Такого рода методы нашли широкое применение благодаря регулярным съёмкам, выполняемым современными зарубежными космическими РСА по всей поверхности Земли. Среди примеров приложений интерферометрии можно назвать оценку последствий землетрясений [1], мониторинг береговых просадок почвы [2], движения ледников [3] и оползневых склонов [4]. Оценка деформаций поверхности в результате извержений вулканов — также одно из часто встречающихся приложений интерферометрии [5,6].

Использованные материалы и методика обработки

В настоящей работе для измерения смещений на вулкане Крашенинникова и в его окрестностях были использованы данные европейских спутников Sentinel-1A, Sentinel-1C и отечественного «Кондор-ФКА» №2. На сделанных спутником Sentinel-1 в IW режиме (Interferometric Wide) РСА снимках формата SLC (Single Look Complex) с предельным разрешением по наземной дальности оно равно 5 м, а вдоль линии пути (по азимуту) 20 м. Типовая цепочка интерферометрической обработки при построении 16 интерферограмм включала развертку фазы на сформированных интерферограммах, вычитание топографической фазы, фильтрацию шумов адаптивным окном Голдстина, коррекцию тропосферного набега фазы, пересчет дифференциальной фазы в радиальные смещения и геокодирование. Вследствие некогерентного усреднения по 4 пиксела по дальности был дополнительно снижен уровень шумов и выровнен размер пиксела на интерферограммах по наземной дальности и азимуту. Благодаря съемкам с восходящего и нисходящего витков орбиты на период с конца июля о середину августа 2025 года оказалось возможным наблюдать детальную картину трансформации поверхности вулканического купола, подробно изложенную в работе [7].

Пример радиолокационного изображения вулкана Крашенинникова и интерферограммы в радиолокационной системе координат из сеансов 25 июля и 5 августа 2025 года, полученных со спутника Sentinel-1, приведен на рис. 1. Съемка в этих сеансах проводилась с нисходящего витка орбиты. На изображении видна кальдера с двумя главными кратерами - небольшим южным и широким северным, внутри которого расположен ещё один внутренний кратер. На интерферограмме контуры северного и южного кратеров отмечены красными кругами. В дальнейшем на картах измеренных смещений их контуры также будут изображены для привязки к местности.

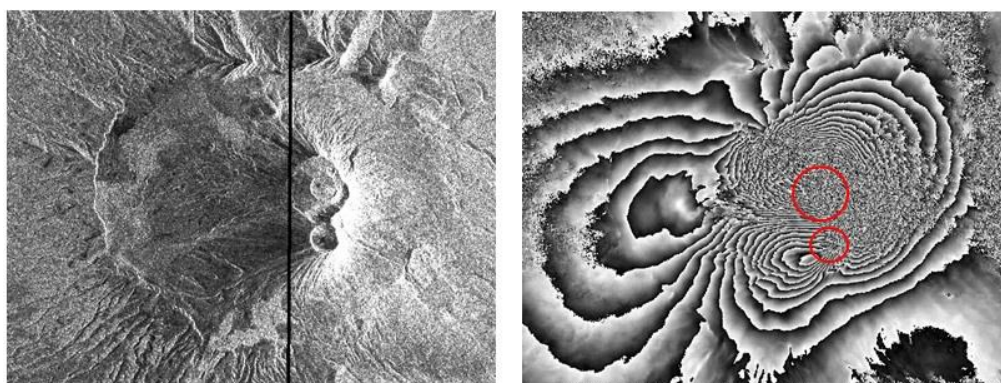


Рис. 1. Радиолокационное изображение РСА «Кондор-ФКА» №2 для вулкана Крашенинникова (слева) и интерферограмма (справа)

В качестве альтернативного варианта выявления динамики покровов вулкана был использован метод корреляционного отслеживания смещений деталей поверхности на амплитудном изображении применительно к снимкам высокодетального отечественного РСА «Кондор-ФКА» №2, сделанных 07.07.202 и 08.08.2025 г. На рис. 1 зона покрытия поверхности вулкана съемкой этим радаром расположена левее черной линии.

Измерения смещений методом радарной интерферометрии

Интерферограмма на рис. 1 дает общую картину фазового набега по модулю 2π на интервале 12 дней между съемками, включая событие извержения 3 августа, охватывающем все события максимальными смещениями участков поверхности вулканического конуса. После раскрытия неоднозначности фазовых измерений и перевода фазы в радиальные смещения, суммарную за весь активный период деформаций картину вдоль широтного сечения поверхности вулкана можно представить в виде графиков (см. для примера рис. 2). Здесь по горизонтальной оси отложено расстояние по поверхности с запада на восток. Геометрия правосторонней съемки РСА Sentinel-1 такова, что, что на нисходящем витке радар смотрел с востока на область съемки, а на восходящем – с запада. Красная линия на графике – смещения поверхности при измерениях с западной стороны. В предположении горизонтальных деформаций положительные смещения на западном склоне говорят о его смещении на запад, а отрицательные на восточном склоне – о перемещении восточного склона на восток. Желтая линия описывает измерения с нисходящего витка, с восточной стороны. В этом случае отрицательные смещения на западном склоне говорят о его смещении на запад, а положительные на восточном склоне – о перемещении восточного склона на восток. Центральная точка с нулевым смещением находится чуть западнее центра северного вулканического конуса, внутри кальдеры с высотой дна ~900 м, лежащей в пределах 14600-24200 м на графике.

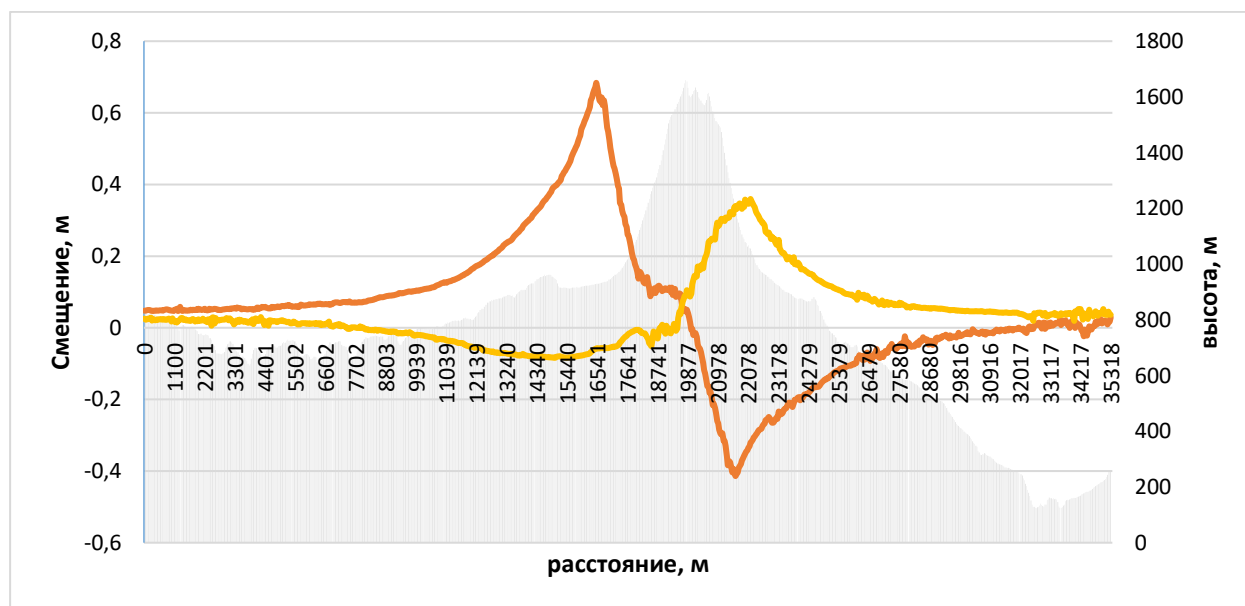


Рис. 2. Красная линия – измерения смещений на восходящем витке, желтая линия – измерения смещений на нисходящем витке, серая линия с заливкой – высота рельефа

Рассмотрим далее более детально историю смещений. Развитие динамики поверхности вулкана до момента извержения показано на рис. 3 в виде фрагментов карт радиальных смещений. Здесь и далее карты радиальных смещений поверхности

даются в полутоновом виде, в отличие от графиков рис. 2. Цветовая шкала на всех трёх одинакова: это градации серого между двумя крайними значениями: чёрный цвет — смещения от радара на 10 см и более, белый — смещения к радару на 10 см и более. Красными кольцами на рис. 3 показаны контуры южного и северного кратеров вулкана. На рис. 3а) (интервал времени 18-30 июля) и 3б) (интервал времени 19-31 июля) никаких заметных смещений на поверхности вулкана и вокруг него не отмечается. На рис. 3в) мы видим, что на интервале 26 июля – 1 августа западный склон вулкана преимущественно удаляется от спутника, восточный — преимущественно приближается к нему, однако разделение проходит не по оси симметрии вулкана, а западнее, и в районе кратеров посреди белой области приближения (поднятия) имеется узкое тёмное пятно — провал. Таким образом, можно заключить, что между 31 августа и 1 июля, в подземной части вулкана уже начались активные процессы, приведшие к смещениям на поверхности ещё до начала извержения. Измеренные проекции смещений на линию визирования на рис. 3в) составляют от -12 до +22 см.

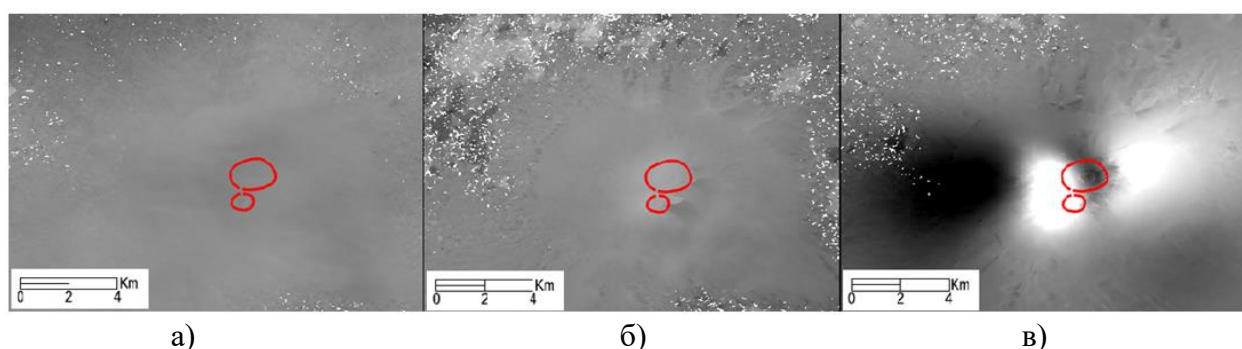


Рис. 3. Карты смещений, полученные по интерферограммам 18-30 июля (а), 19-31 июля (б) и 26 июля – 1 августа (в).

Карты радиальных смещений для следующих по хронологическому порядку четырёх пар изображений, у которых конец интервала приходится на 5-7 августа, приведены на рис. 4. Все они охватывают дату начала извержения и являются наиболее яркими из всех 16 обработанных пар. Верхний ряд рис. 4 получен с восходящего витка, в котором направление обзора с запада на восток, а нижний ряд - с противоположного, нисходящего витка, с направлением обзора с востока на запад. Этим объясняется различие в положении тёмных и светлых пятен: смещение на восток в геометрии съёмки верхнего ряда будет удалением от радара (чёрный цвет), а в геометрии нижнего ряда, напротив, приближением к радару (белый цвет). Максимальные величины радиальных смещений для этих четырёх пар приведены в таблице 1. Поскольку величины смещений в разы превышают те, что показаны на рис. 3в), для рис. 4 выбран новый масштаб цветовой шкалы: от -30 см (чёрный цвет) до +30 см (белый цвет). Смещения поверхности после 6 августа, не приводящиеся здесь, уже намного менее интенсивны по сравнению с периодом, охватывающим извержение 3 августа.

Таблица 1. Экстремальные величины радиальных смещений (в см) на рис. 4

Даты съёмки	Направление витка	Максимальное по модулю отрицательное смещение (от радара), см	Максимальное по модулю положительное смещение (к радару), см
30 июля – 5 августа	Восходящий	-50	+68
25 июля – 6 августа	Восходящий	-44	+72
31 июля – 6 августа	Нисходящий	-26	+37
1 – 7 августа	Нисходящий	-51	+27

Для более точного представления о направлении смещений был применен способ совместного использования сразу нескольких интерферограмм, полученных с противоположных витков, что позволяет оценить смещения в двух направлениях (горизонтальном по оси «восток-запад» и вертикальном) [8]. На рис. 5 показан результат объединения интерферометрических пар, имеющих наиболее близкие даты съёмок: 30 июля – 5 августа и 31 июля – 6 августа. Чёрный цвет соответствует смещениям 30 см и более на запад (рис. 5а) и вниз (рис. 5б), белый цвет — смещениям на 30 см и более на восток (рис. 5а) и вверх (рис. 5б). Максимальные смещения в направлении восток-запад составляют 73 см на запад и 67 см на восток. Необходимо подчеркнуть, что неполное перекрытие интервалов съёмок пар снимков и неизбежно разные картины радиальных смещений не дадут абсолютно точной картины слабых вертикальных смещений.

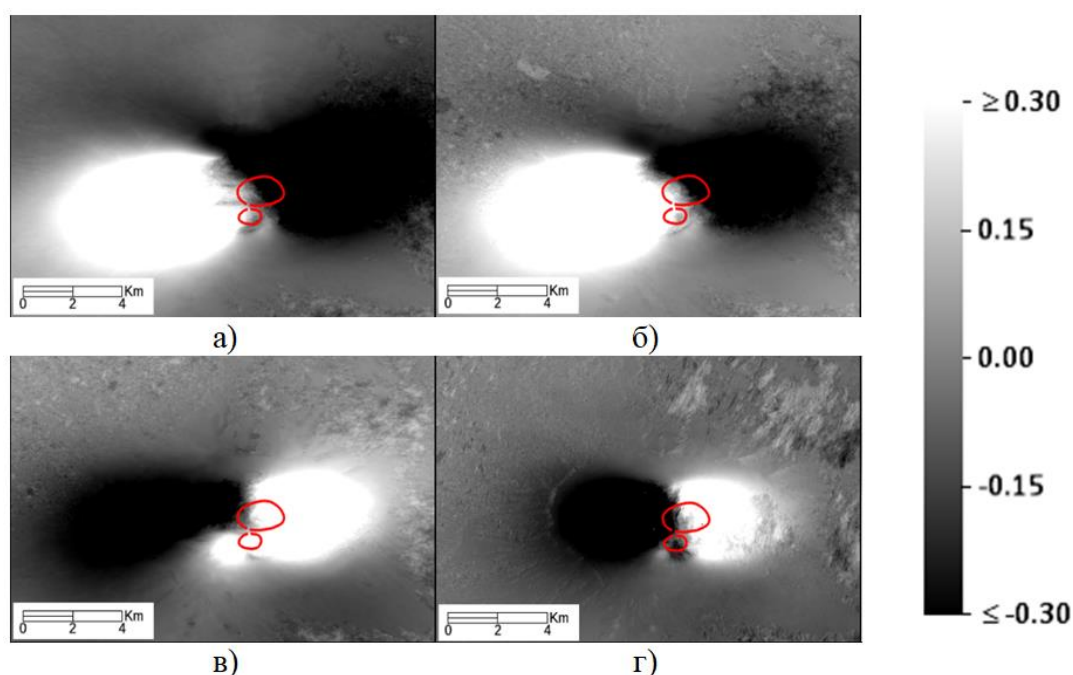


Рис. 4. Карты радиальных смещений для четырёх пар: а) 30 июля – 5 августа; б) 25 июля – 6 августа, в) 31 июля – 6 августа; г) 1–7 августа. Цветовая шкала в метрах.

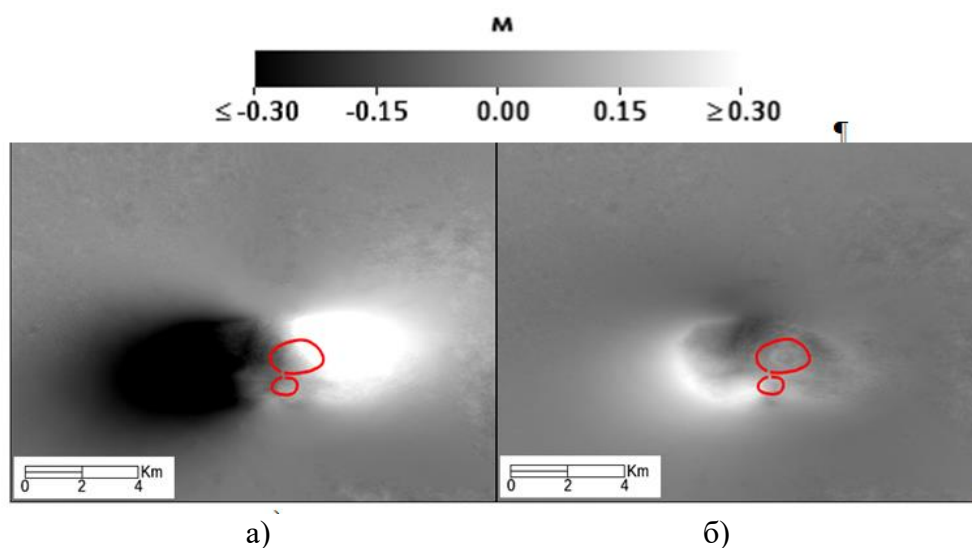


Рис. 5. Разложение величин измеренных радиальных смещений на два направления: восток-запад (а) и верх-низ (б)

Специфика метода интерферометрических измерений смещений по разности фаз сигналов двух снимков такова, что измеряемые радиальные смещения есть проекция истинных смещений на линию визирования РСА, вследствие чего измерение азимутальных (меридиональных) смещений поверхности вулкана с околополярных орбит спутников типа Sentinel-1 или «Кондор-ФКА» №2 невозможно. Предположение о вероятности азимутальных (север-юг) смещений сделано в работе [7] исходя из результатов моделирования радиально симметричных смещений относительно центрального канала выхода магмы.

Измерение смещений методом корреляционного анализа смещений деталей изображений

Метод корреляционного отслеживания смещений деталей изображения (в зарубежной литературе *feature tracking*, *amplitude tracking*) широко применяется несколько десятилетий для наблюдений ледовых полей поверхностей водоемов, ледников и др. В первой из отечественных статей начала 90-х годов этим способом на радарных снимках РСА «Алмаз-1» было выявлено движение ледника Хайса на побережье Антарктиды [9,10]. В зарубежных работах корреляционным методом выявлялись смещения деталей поверхности на радарных и оптических снимках [11-14].

Наиболее надежный результат применения указанного корреляционного способа может быть получен при смещении деталей на величину более одного пиксела на изображении. Субпиксельные измерения возможны, как правило, при работе по ярким точечным или контрастным объектам. В работе [15] показано, что субпиксельная точность измерений пропорциональна отношению сигнала детали изображения к фоновому/шумовому сигналу окружающей поверхности.

Как было показано выше, линейные смещения поверхности вулкана Крашенинникова в направлении восток-запад в процессе извержения не превышали 0.7 м относительно гипотетического центра расширения. Использование данных Sentinel-1 с разрешением 5*20 м представляется не слишком перспективным для оценки сдвигом методом корреляционного анализа столь малых смещений деталей на изображении, существенно меньших разрешения. Радиолокационные снимки РСА «Кондор-ФКА» №2 с межпиксельным расстоянием по наклонной дальности 0.5 м и по азимуту 1.25 м оказались более предпочтительными. Съемки от 7 июля и 8 августа 2025 года, наиболее близкие к моменту извержения и охватывающие его, оказались наиболее предпочтительными для целей исследования еще и из-за малой интерферометрической базы, что важно с точки зрения снижения пространственной и временной декорреляции сигналов. В область съемки с нисходящего витка орбиты справа по ходу движения КА попала западная часть кальдеры, западнее главных кратеров (см. рис. 1а). Оценка смещений поверхности на втором снимке по отношению к первому выполнялась путем корреляционного совмещения фрагментов изображений размером 64*64 пиксела. Для повышения точности измерений выполнялась четырехкратная интерполяция отсчетов двумерной взаимно-корреляционной функции методом раздвижки спектра в частотной области [16].

На рис. 6 – приведены радиолокационное изображение западной части кальдеры и соответствующие карты сдвигов в горизонтальном и вертикальном направлении по данным РСА «Кондор-ФКА» №2. Учитывая четырехкратную интерполяцию отсчетов взаимно-корреляционной функции, получим, что в вертикальном направлении (на юг) имело место смещение на 4 отсчета или 1.2 м, а по горизонтали (на запад) на 0.5 м по наклонной дальности или 1 м по наземной дальности. Красными стрелками, выходящими из центров областей смещения, показаны направления горизонтального (центральный рисунок) и вертикального (правый рисунок) сдвигов. Символом

красного цвета А на центральном рисунке с горизонтальными смещениями отмечено вероятное смещение поверхности влево или вверх, выявленное на рис. 5б вблизи кружка, отмечающего положение южного кратера. Необходимо подчеркнуть, что это интегральная картина смещений за весь период активности вулкана.

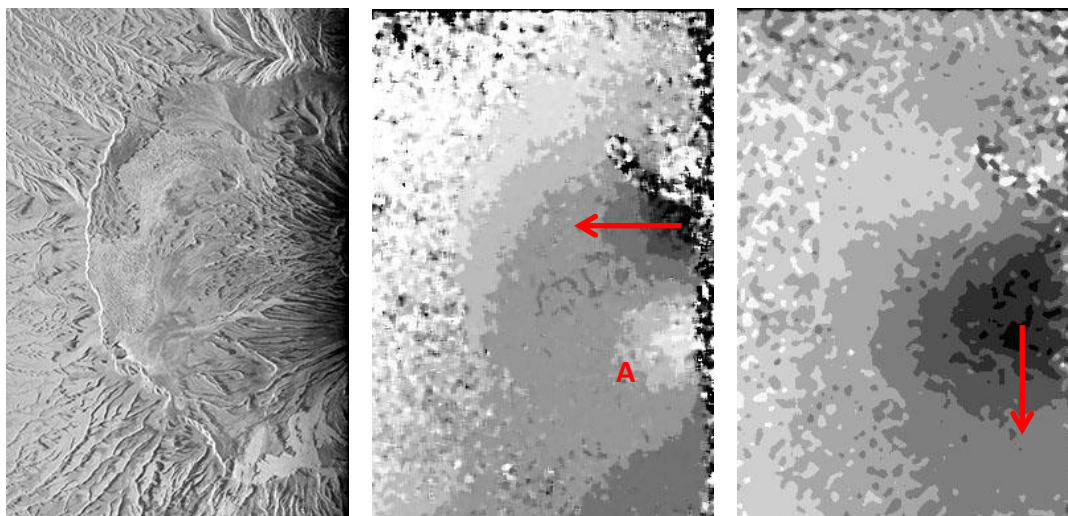


Рис. 6. Радиолокационное изображение РСА «Кондор-ФКА» №2 для западной части кальдеры (слева) и карты смещов в направлении восток-запад (в центре) и направлении север-юг (справа)

Результаты измерения смещений в западном направлении западной части поверхности кальдеры по данным РСА «Кондор-ФКА» №2 согласуются и качественно, и количественно с интерферометрическими измерениями по данным РСА Sentinel-1. Благодаря корреляционному методу выявлены смещения в ортогональном (север-юг) направлении. Эти смещения примерно равны смещениям в западном направлении, что подтверждает радиально-симметричную модель расширения кальдеры вулкана Крашенинникова.

Заключение

Интерферометрические измерения подвижек поверхности вокруг вулкана Крашенинникова, сделанные благодаря применению методов радарной интерферометрии в обработке данных РСА Sentinel-1, позволяют охарактеризовать величины смещения, произошедшие в результате извержения, как радиально направленные, величиной не менее 70 см в восточном и западном направлении. Вблизи южного кратера выявлен подъем поверхности на 30 см. С помощью корреляционного метода выявления смещений на снимках РСА «Кондор-ФКА» №2 подтверждено смещение западного склона вулкана в западном направлении примерно на 1 метр, а также обнаружено смещение участка поверхности в южном (азимутальном) направлении, что подтверждает предположение о радиально-симметричном характере расширения кальдеры вулкана Крашенинникова.

Авторы признательны госкорпорации «Роскосмос» и Европейскому космическому агентству за предоставленные данные.

Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Литература

1. Massonnet, D., et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry // Nature. 1993. Vol. 364, No. 8. P. 138-142.

2. Strozzi T., Tosi L., Teatini P., Werner C. and Wegmüller U. Monitoring land subsidence within the Venice Lagoon with SAR interferometry on Trihedral Corner Reflectors," 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, South Africa, 2009. P. IV-33-IV-36.
3. Kenyi L. W. and Kaufmann V. Estimation of rock glacier surface deformation using SAR interferometry data// IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41. No. 6. P. 1512-1515.
4. Qiu Y., Wang Y., Cui X., Yuan D. and Li P. Unstable Slope Identification and Monitoring Using Polarization-Enhanced DS-InSAR: A Case Study in the Bailong River Basin// IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2025. Vol. 18. P. 11142-11154
5. Solaro G. et al. The Deforming Etna Volcano Imaged Through SBAS-DInSAR Analysis: its Long Term Behaviour and the Recent Seismo-Volcanic Crisis of December 2018// IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019. P. 9702-9704.
6. Tessari G., Puliero S., Atzori S., Ogushi F. and Pasquali P. Integration of InSAR and GNSS Data to Monitor Volcanic Activity of Sakurajima Calderas, Japan: from Small Displacement Measurements to Geophysical Modeling// IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Waikoloa, HI, USA, 2020. P. 6838-6841.
7. Л. Н. Захарова, А. И. Захаров. Наблюдение деформации склонов вулкана Крашенинникова после его извержения в августе 2025 года методами радиолокационной интерферометрии// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 6. С. 400-411
8. Hu J., Li Z. W., Ding X. L. et al. Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review // Earth-Science Reviews. 2014. V. 133. P. 1–17.
9. Zakharov A.I. Ice fields motion in the Antarctic area from Almaz-1 repeated orbit SAR interferometry. Proceedings of the SAR calibration workshop, University of Michigan, Ann Arbor, USA, September 1994. P. 191-200.
10. А.И. Захаров, П.В. Тугаринов. Исследование динамики ледовых покровов побережья Антарктиды по данным интерферометрической съемки РСА "Алмаз 1"// Радиотехника. – 1998. № 8. С. 27-31.
11. T. Strozzi, A. Luckman, T. Murray, U. Wegmüller, C.L. Werner, Adrian Luckman. Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures//IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 40. No. 11. P. 2384 – 2391
12. Singleton, Z. Li, T. Hoey, J.-P. Muller. Evaluating sub-pixel offset techniques as an alternative to D-InSAR for monitoring episodic landslide movements in vegetated terrain // Remote Sensing of Environment, 2014, V. 147, P. 133–144
13. Lucchitta, B.K. and Ferguson, H.M. (1986). Antarctica: Measuring glacier velocity from satellite images // Science. No. 234(4780). P. 1105–1108
14. Heid, T., Kääb, A. Evaluation of existing image matching methods for deriving glacier surface displacements globally from optical satellite imagery // Remote Sens. Environ. 2012. Vol. 118. P.339–355
15. R. Bamler and M. Eineder. Accuracy of differential shift estimation by correlation and split bandwidth interferometry for wideband and delta-k SAR systems. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2005. Vol. 2. No. 2. P. 151–155.
16. Tong, X., Luan, K., Stilla, U., Ye, Z., Xu, Y., Gao, S., Xie, H., Du, Q., Liu, S., Xu, X., and Liu, S. Image registration with Fourier-based image correlation: A comprehensive review of developments and applications IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019. Vol. 12(10). P. 4062–4081