

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

Л. Н. Захарова, А. И. Захаров

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия
E-mail: ludmila@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 г., впервые в истории наблюдений измерены мелкомасштабные смещения поверхности склонов вулкана Крашенинникова и описана их динамика, вызванная извержением, которое началось 3 августа. По измерениям смещений поверхности склонов вдоль линий наклонной дальности от радара до поверхности при съёмке с восточного и западного направления выделены вертикальная и горизонтальная компоненты смещений. Обнаружено, что активные процессы деформации поверхности начались за 1–2 дня до начала извержения, вскоре после землетрясения. Предложена интерпретация наблюдаемого характера компонент смещений: геометрическая радиально-симметричная модель деформаций. В соответствии с ней, измеренные величины свидетельствуют о расширении жерла вулкана в горизонтальном направлении на величину не менее полутора метров. Области вертикальных смещений незначительны по площади и имеют максимальную амплитуду 31 см. Просадка поверхности величиной 16 см на северном склоне произошла, вероятно, в результате образования полости на месте излившейся лавы. Также на интерферограммах и картах интерферометрической когерентности прослежен путь излившейся лавы и характер её продвижения.

Ключевые слова: радиолокационная интерферометрия, смещения поверхности, извержение, вулкан Крашенинникова

Одобрена к печати: 13.11.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-400-411

Введение

Вулкан Крашенинникова на Камчатке — один из действующих современных вулканов, однако предыдущее свидетельство его извержения относится к XV в. В середине XX в. в кратере вулкана были отмечены следы выхода на поверхность вулканического газа. Утром 3 августа 2025 г. по камчатскому времени, через несколько дней после крупного землетрясения магнитудой 8,8 у берегов Камчатки, началось новое извержение вулкана Крашенинникова: были зафиксированы выбросы пепла на высоту 4 км над уровнем моря (Гирина и др., 2025).

Данные и методы

В работе использован такой метод дистанционного наблюдения вулкана в процессе его извержения, как радиолокационная интерферометрия. Измерения смещений поверхности с помощью радиолокационной интерферометрии космического базирования стали незаменимым инструментом благодаря регулярным съёмкам с космической орбиты всей поверхности Земли. Среди примеров приложений интерферометрии можно назвать оценку последствий землетрясений (Massonnet et al., 1993), мониторинг береговых просадок почвы (Strozzi et al., 2009), движения ледников (Kenyi, Kaufmann, 2003), оползневых склонов (Qiu et al., 2025). Оценка деформаций на вулканах — также одно из часто встречающихся приложений интерферометрии (Solaro et al., 2019; Tessari et al., 2020). В настоящей работе для измерения смещений на вулкане Крашенинникова и в его окрестностях были использованы данные

европейских спутников Sentinel-1A и Sentinel-1C, полученные с четырёх условных траекторий с интервалами между съёмками внутри каждой пары снимков 6, 12 и 18 дней. Схематически даты съёмок, а также основных событий (землетрясения и начала извержения) приведены на *рис. 1*, отсечки дней показывают начало суток по времени UTC (англ. Coordinated Universal Time).

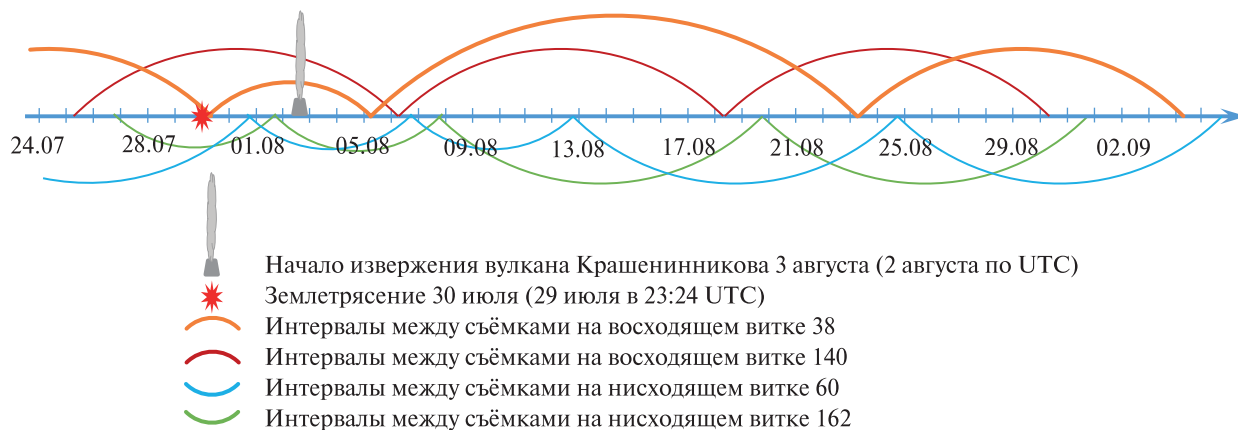


Рис. 1. Даты съёмок, интервалы между ними и даты основных событий

Для оценки смещений поверхности были построены 16 интерферограмм для 16 пар снимков, условно изображённых дугами на *рис. 1*. Дуги красного и оранжевого цвета соответствуют парам съёмок с восходящего витка орбиты, синего и зелёного — с нисходящего витка. Типовая цепочка интерферометрической обработки включала развёртку фазы на сформированных интерферограммах (не приводимых в статье), вычитание топографической фазы, коррекцию тропосферного набега фазы, пересчёт дифференциальной фазы в радиальные смещения и геокодирование. Под радиальными смещениями здесь и далее имеются в виду смещения поверхности в направлении радара, измеряемые в ходе обработки интерферометрической пары снимков.

На *рис. 2* приведены оптическое (Google Earth) и радиолокационное (Sentinel-1A, съёмка 25.07.2025) изображения вулкана Крашенинникова. На обоих видна восьмёркообразная объединённая структура двух главных кратеров: небольшой южный и широкий северный, внутри которого расположен ещё один внутренний кратер. На последующих изображениях измеренных смещений контуры этих кратеров будут изображены для привязки к местности.

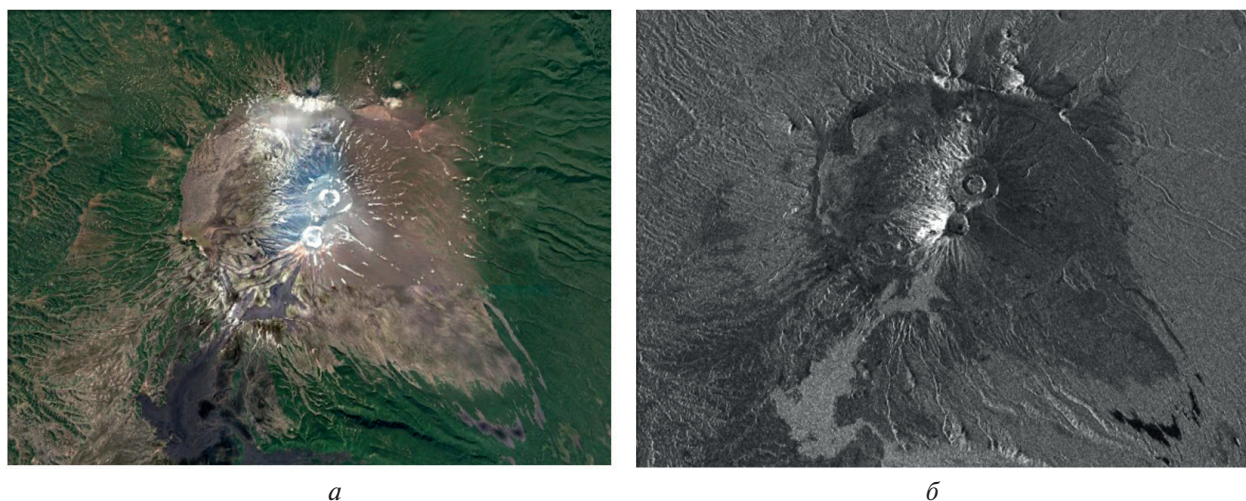


Рис. 2. Оптическое (а) и радиолокационное (б) изображение вулкана Крашенинникова

Измерения смещений с восходящих и нисходящих витков

Съёмки с интервалом, охватывающим землетрясение 30 июля 2025 г., позволили оценить величины деформаций поверхности на большой площади — вся южная оконечность Камчатки претерпела заметные смещения, на восточном побережье доходящие до величины 1,7 м и спадающие до нуля при удалении от тихоокеанского побережья в северо-западном направлении (<https://t.me/kbgsras/5723>, https://fireras.su/Announce/Камчатка_EastDisplacements.jpg), и событие такого масштаба не могло не отразиться на активизации камчатских вулканов (<https://www.kommersant.ru/doc/7940634>). Однако на двух интерферограммах, охватывающих момент землетрясения (18–30 июля — самая левая оранжевая дуга с правым концом через несколько часов после землетрясения на *рис. 1*; 19–31 июля — самая левая голубая дуга на *рис. 1*), в районе вулкана Крашенинникова нет никаких признаков локальных деформаций и даже следы общего площадного смещения, вызванного землетрясением, на такой удалённости от эпицентра землетрясения 30 июля уже не проявляются. При этом на паре трека 162, также охватывающей землетрясение (26 июля–1 августа — самая левая зелёная дуга на *рис. 1*), картина совершенно другая: на вулкане и вокруг отмечаются заметные радиальные смещения, причём как в положительную (к радару), так и в отрицательную (от радара) сторону. На *рис. 3* показаны фрагменты карт радиальных смещений, полученных с помощью трёх вышеназванных интерферограмм. 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* и *б*, как было сказано выше, никаких заметных смещений на вулкане 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 поверхности ещё до зафиксированного другими наблюдениями начала извержения — первый выброс пепла был отмечен 2 августа в 18:30 (Гирина и др., 2025). Измеренные проекции смещений на линию визирования на *рис. 3в* составляют от –12 до +22 см.

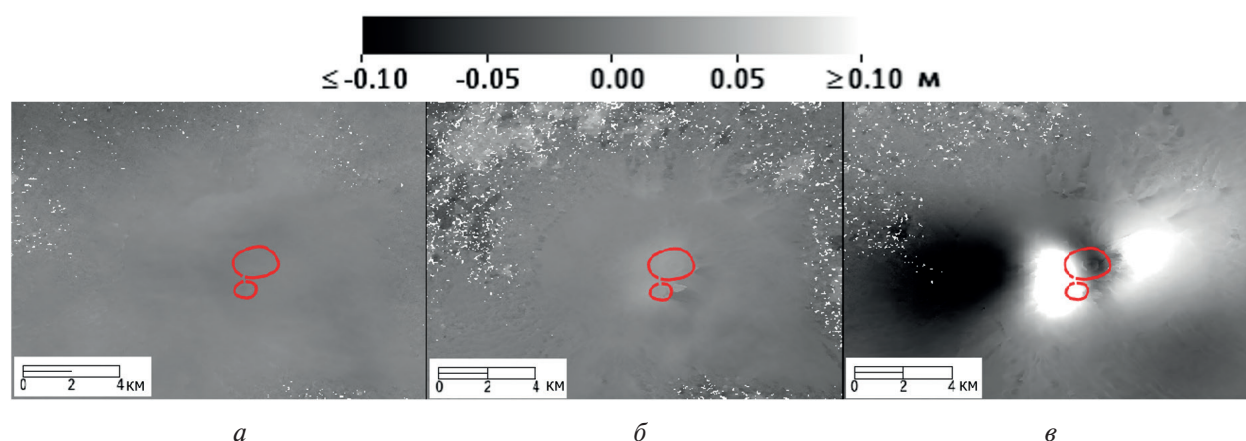


Рис. 3. Карты смещений, полученные по интерферограммам 18–30 июля (*а*), 19–31 июля (*б*) и 26 июля – 1 августа (*в*)

Карты радиальных смещений для следующих по хронологическому порядку четырёх пар изображений, у которых конец интервала приходится на 5–7 августа, приведены на *рис. 4* (см. с. 403). Все они охватывают дату начала извержения (см. *рис. 1*) и являются наи-

более 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*. 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).

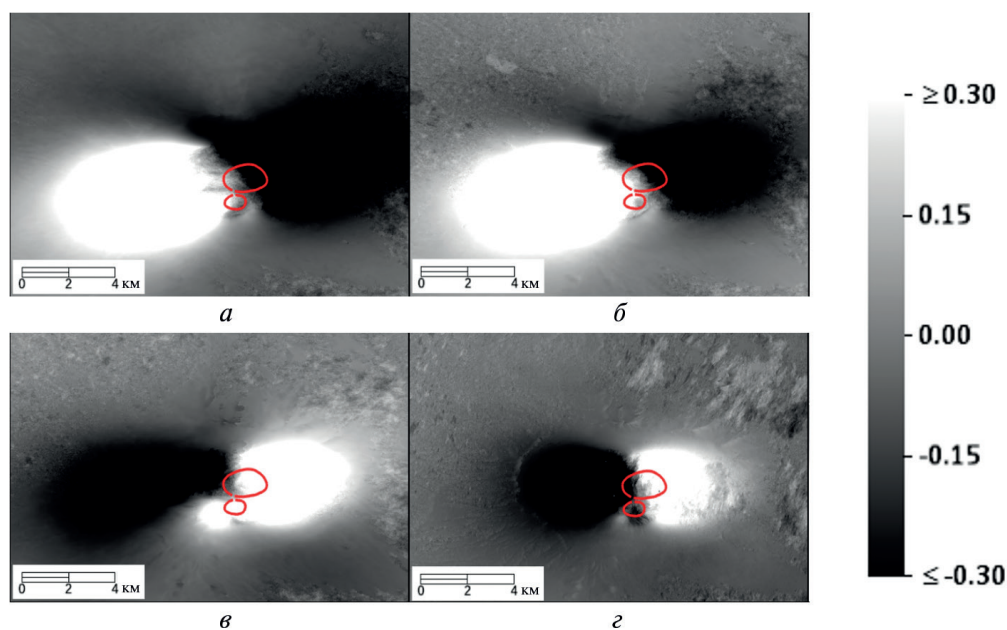


Рис. 4. Карты радиальных смещений для четырёх пар: *a* — 30 июля — 5 августа; *б* — 25 июля — 6 августа; *в* — 31 июля — 6 августа; *г* — 1–7 августа. Цветовая шкала в метрах

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 | | –44 | +72 |
| 31 июля — 6 августа | Нисходящий | –26 | +37 |
| 1–7 августа | | –51 | +27 |

Из *таблицы* видно, что, несмотря на общий паттерн распределения величин смещений по поверхности для измерений, сделанных с восходящего или нисходящего витка (верхняя или, соответственно, нижняя панель *рис. 4*), разброс значений экстремумов достаточно сильно выражен. Причин этому может быть несколько: разная степень декорреляции сигнала, по-разному скрывающая экстремальные значения, расположенные вблизи вершины, разные углы прихода сигнала на разных трассах съёмки, а также несовпадающие интервалы между съёмками.

Итак, на *рис. 4* видно, что оба направления съёмки — как с запада на восток на восходящих витках (*рис. 4*, сверху), так и с востока на запад на нисходящих витках (*рис. 4*, снизу) — демонстрируют смещение восточного склона преимущественно на восток, а западного — преимущественно на запад. Учитывая радиальную симметричность строения стратовулканов,

факт извержения 3 августа, а также паттерн смещений (величина смещения растёт от подножия к вершине), можно предположить, что такие наблюдаемые смещения вызваны эксплозией в жерле вулкана, раздвинувшей склоны во всех направлениях приблизительно одинаково. В этом случае интерферометрические измерения как раз и должны показать смещение восточного склона на восток, западного на запад, а смещения такой же величины на северном и южном склонах метод почувствует в меньшей степени (вплоть до отсутствия) в силу особенностей геометрии радиолокационной съёмки.

Разложение на вертикальные и горизонтальные смещения

Для более точного представления о характере смещений между съёмками применяют способы совместного использования сразу нескольких интерферограмм. Техника объединения интерферограмм, полученных с противоположных витков (Hu et al., 2014), для оценки смещений в двух направлениях (горизонтальном по оси восток-запад и вертикальном) позволяет получить картину, показанную на *рис. 5*. Для объединения выбраны пары, имеющие наиболее близкие даты съёмок: 30 июля – 5 августа и 31 июля – 6 августа. На *рис. 5* чёрный цвет соответствует смещениям 30 см и более на запад (см. *рис. 5а*) и вниз (см. *рис. 5б*), белый цвет — смещениям на 30 см и более на восток (см. *рис. 5а*) и вверх (см. *рис. 5б*). Максимальные смещения в направлении восток-запад составляют 73 см на запад и 67 см на восток. Эти величины, довольно близкие друг к другу, также косвенно свидетельствуют о том, что в характере деформации склонов от условного центра вулканического конуса имела место симметрия.

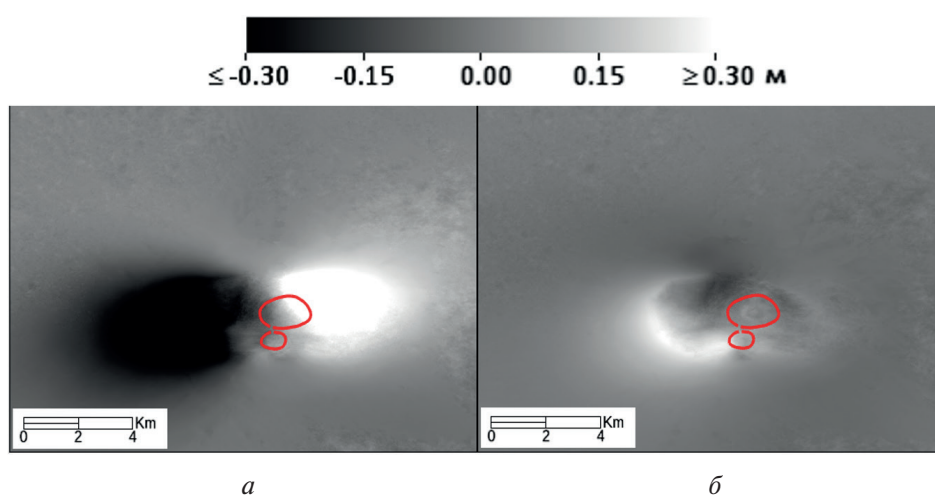
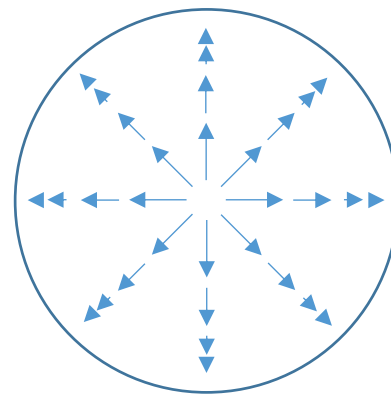


Рис. 5. Разложение измеренных радиальных смещений на два направления: восток-запад (*а*) и верх-низ (*б*)

Отметим, что на *рис. 5а* центральная часть (между белым и чёрным пятном) имеет серый цвет и, соответственно, околонулевые значения смещения, т.е. выглядит неподвижной. Это обманчивое впечатление создаётся за счёт сильной декорреляции сигнала вблизи вершины вулкана, вызванной тем, что из-за возрастающей величины смещений частота интерференционных полос увеличивается настолько, что фаза возрастает на период (2π) каждые два пикселя и чаще, что делает крайне затруднительной развёртку фазы в этом месте, интерферометрическая когерентность падает и информацию о смещениях становится извлечь невозможно. Таким образом, максимальные смещения можно только оценить снизу, при этом реальная величина смещений вблизи самой вершины может заметно превышать эту оценку.

На карте вертикальных смещений (см. *рис. 5б*) обращает на себя внимание кольцообразная белая структура, в северной части разомкнутая. Белый цвет в выбранной цветовой шкале соответствует подъёму поверхности.

Рис. 6. Предполагаемый характер смещений поверхности идеального вулканического конуса в результате эксплозии



При горизонтальных смещениях, направленных в стороны от вершины (рис. 6), естественно предположить, что на некотором расстоянии от центральной точки (т. е. источника смещений в жерле) горизонтально направленная сила, встретив сопротивление окружающих неподвижных пород, будет выдавливать поверхность вверх, образуя небольшой кольцевой вал. Максимальное измеренное смещение вверх составляет 31 см в юго-западной части светлого кольца.

Второй после кольцевого подъёма поверхности заметной деталью на рис. 5б стало тёмное пятно, делающее кольцо разомкнутым в его северной части. Поскольку именно на север из северного кратера излился основной лавовый поток в результате извержения вулкана Крашенинникова 3 августа 2025 г., можно предположить, что эта просадка произошла в результате образования полости на месте излившейся лавы. Максимальное смещение вниз достигает 16 см и расположено в области разрыва кольца.

Модель смещений, использующая предположение о радиальной симметрии

Для оценки справедливости предположения о преимущественном характере смещений по радиусу от центра можно промоделировать строго горизонтальные смещения, направленные от вертикальной оси симметрии конического вулкана, модуль которых спадает при удалении от центральной точки (см. рис. 6). Углы обзора и направление полёта спутника выбраны в соответствии с реальными данными, участвовавшими в обработке для получения смещений на рис. 5. Результаты моделирования приведены на рис. 7 (см. с. 406).

В отличие от реальных данных (см. таблицу), идеальные модельные смещения не имеют перекоса в экстремумах: проекция на восходящий виток даёт значения в пределах $\pm 68\%$ от исходного горизонтального (см. рис. 7а), на нисходящий — $\pm 54\%$ (см. рис. 7б). Восстановление горизонтальной составляющей происходит не в полном объёме, что естественно при отсутствии данных о смещениях в третьем линейно независимом направлении: на рис. 7в максимум достигает 79% от исходной величины смещения в обе стороны. Таким образом, даже при отсутствии декорреляции оценка смещений этим методом даёт заниженные результаты. Возвращаясь к величинам смещений 73 см на запад и 67 см на восток, упомянутым при обсуждении рис. 5, можно принять 70 см за среднюю величину измеренного смещения, и, учитывая, что измерение даёт не более 79% от исходной величины, получаем, что горизонтальное смещение могло составить 89 см во все стороны, что позволяет оценить расхождение стенок жерла вулкана на величину более чем полтора метра.

Кроме того, на рис. 7 есть проявление смещений там, где их в реальности не было — на вертикальной составляющей (см. рис. 7г) они достигают 17% исходной (горизонтальной) величины, причём область максимальных искажений находится в непосредственной близости от центральной точки — источника смещений. Возможно, это явление отчасти объясняет неравномерную выраженность кольцеобразного воздымания на рис. 5б, где максимум (до 31 см) приходится как раз на юго-западную дугу. На реальные данные этот эффект сильного искажающего влияния не оказывает, поскольку эхо-сигналы именно центральной части вблизи кратеров подвержены сильной декорреляции, так что измерение смещений непосредственно в этой области недоступно, а на отдалении от центральной части эффект слабо заметен. Следует упомянуть, что в публикации о смещениях на склонах стратовулкана Этна (Solaro et al., 2019) изображения смещений на восходящем и нисходящем витке и изображение горизонтальных подвижек соответствует рис. 4, 5, а также модели на рис. 7, и так же, как

в случае вулкана Крашенинникова, вертикальные смещения вносят заметно меньший вклад по сравнению с горизонтальными (хотя и не просматривается кольцевого поднятия, которое, впрочем, может быть маскировано выбранной цветовой шкалой или областью декорреляции сигнала вблизи вершины), что, возможно, свидетельствует об общем характере смещений на стратовулканах во время извержений и подтверждает справедливость выбранной простой модели.

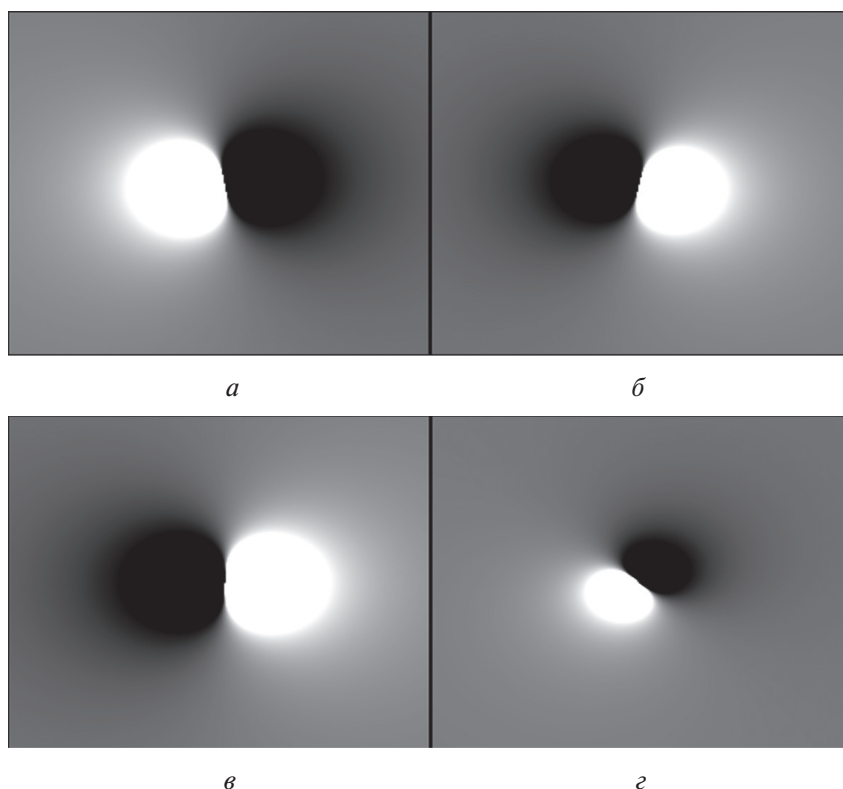


Рис. 7. Модель радиально раздвигающейся по горизонтали поверхности: а — проекция на направление съёмки с восходящего витка (ср. с рис. 4а и 3б); б — проекция на направление съёмки с нисходящего витка (ср. с рис. 4в и 3в); в — восстановленные горизонтальные смещения (ср. с рис. 5а), г — восстановленные вертикальные смещения (ср. с рис. 5б)

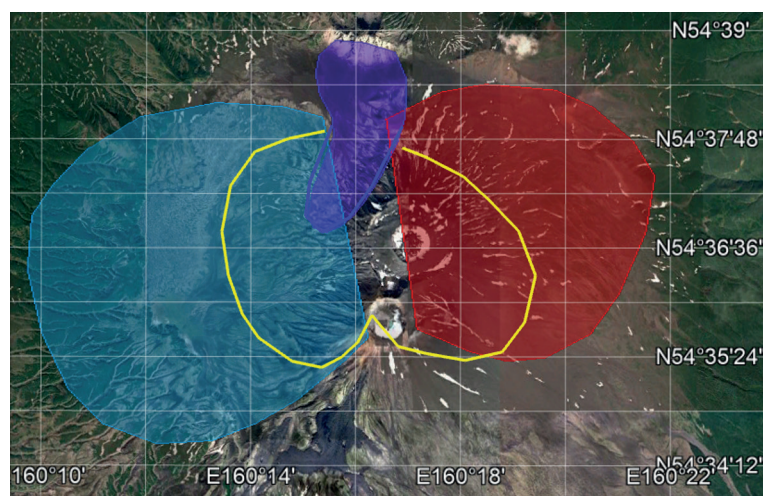


Рис. 8. Расположение областей горизонтальных и вертикальных смещений на поверхности вулкана Крашенинникова. Соответствие цветов и направлений смещения: синий — на запад, красный — на восток, жёлтый — вверх, фиолетовый — вниз

На *рис. 8* (см. с. 406) контуры смещений, показанных на *рис. 5*, нанесены на изображение вулкана Крашенинникова на ресурсе Google Earth. Голубым полупрозрачным цветом залита область смещений на запад, красным — на восток, жёлтый контур отмечает положение кольца воздымания, фиолетовая область соответствует просадке северного склона.

Обнаружение лавовых потоков

В период после 5–7 августа главным источником изменений на поверхности стало течение лавы, которое прослеживается как на амплитудных радиолокационных изображениях, так и на картах когерентности, причём на последних наиболее отчётливо (*рис. 9*). Первое изображение, на котором видно появление лавы, получено 5 августа, длина потока от кромки внешнего кратера составляет около 1,9 км, на последующих изображениях заметно его постепенное продвижение, так что к 4 сентября фронтальная часть сместилась ещё приблизительно на 350 м. На карте *рис. 9б* и в стрелкой показан язык вытекшей лавы на северном склоне вулкана. При этом верхняя часть лавового потока менее отчётливо видна на амплитудном изображении *рис. 9б*, тогда как на карте когерентности (см. *рис. 9в*) весь путь лавы можно проследить от самой кромки внутреннего кратера. Кроме того, на карте когерентности видны два более узких лавовых потока на восточном склоне вулкана, которые сложнее выявить на амплитудном изображении. Длина их составляет также около 2 км. Наиболее свежие данные, полученные в течение сентября 2025 г. (выходят за рамки *рис. 1*), свидетельствуют о продолжении вулканического процесса, поскольку на них прослеживается продвижение одного из меньших потоков лавы, расположенного южнее: его ширина увеличивается, а также появляются новые ответвления.

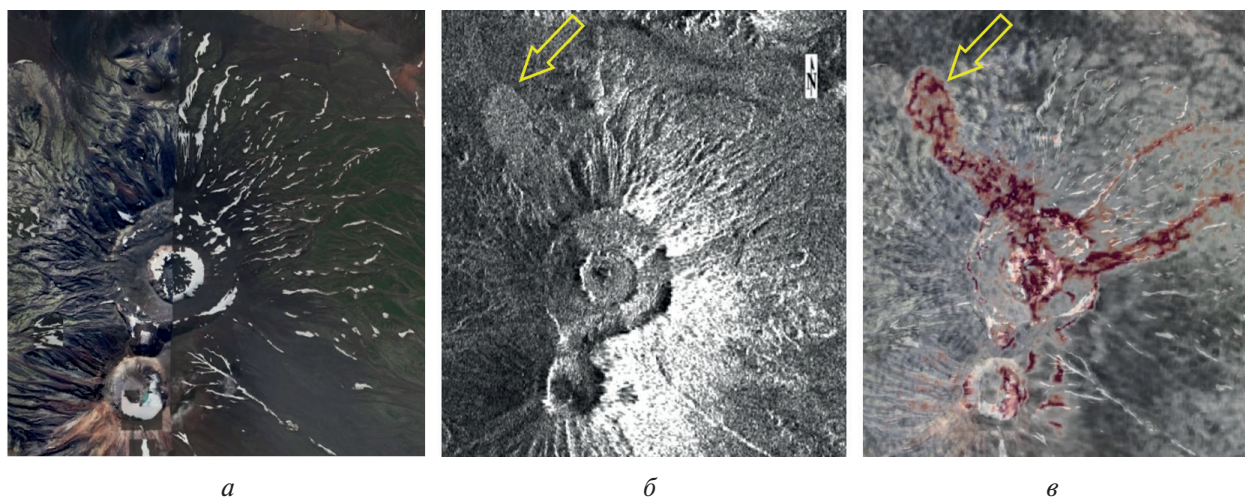


Рис. 9. Изображения области вокруг кратеров: *а* — оптическое (Google Earth); *б* — радиолокационная амплитуда от 6 августа 2025 г.; *в* — интерферометрическая когерентность пары 7–19 августа 2025 г., красный цвет — когерентность 0,25 и ниже. Стрелки указывают на основной лавовый поток

В целом смещения поверхности после 6 августа уже намного менее интенсивны по сравнению с периодом, охватывающим извержение 3 августа, и сосредоточены в области вокруг основного потока лавы (северного).

На *рис. 10* (см. с. 408) показаны измеренные радиальные смещения по данным Sentinel-1, снятым 6–18 и 7–19 августа. Красными контурами по-прежнему обозначены северный и южный кратеры, жёлтый пунктир маркирует положение основного лавового потока. В отличие от смещений на *рис. 3в*, а также на *рис. 4* и *5*, изменения на восходящем витке (см. *рис. 10а*) затрагивают лишь небольшую область в непосредственной близости от северного кратера, которая на нисходящем витке (см. *рис. 10б*) оказывается неподвижной в эти 12 дней.

Таким образом, поскольку изменения присутствуют на паре 6–18 августа и отсутствуют на паре 7–19 августа, можно утверждать, что они произошли в короткий период между 6 и 7 августа, а их расположение по обеим сторонам лавового потока, показанного на *рис. 10а* жёлтым пунктиром, говорит о том, что наиболее вероятной причиной деформации поверхности можно считать вытекание лавы. Максимальное смещение к спутнику в паре 6–18 августа составляет 5 см (белое пятно к востоку от лавового потока), от спутника — 7 см (тёмное пятно к западу от лавового потока). Поскольку величины смещений снова небольшие, цветовая шкала на *рис. 10* возвращена к интервалу ± 10 см и полностью соответствует шкале на *рис. 3*. Объединять интерферометрические пары 6–18 и 7–19 августа для оценки смещения в вертикальном и горизонтальном направлении, как это сделано для других пар выше, смысла нет, поскольку изменения отсутствуют на одной из интерферограмм. Небольшие неоднородности к востоку от обоих кратеров на *рис. 10б*, вероятнее всего, не имеют отношения к реальным смещениям поверхности, поскольку расположены в зоне сжатия радиолокационного изображения, где имеет место декорреляция, и, следовательно, фазовая информация малоинформативна.

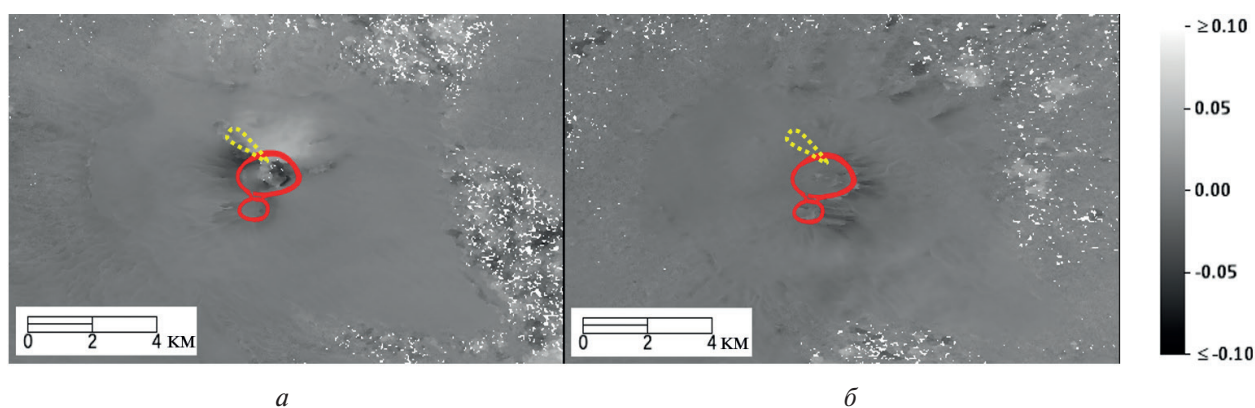


Рис. 10. Радиальные смещения, измеренные с восходящего витка за период 6–18 августа (*а*) и с нисходящего витка 7–19 августа (*б*). Цветовая шкала в метрах

Хронология событий до и после начала извержения

Выполненные измерения, оценки и интерпретации позволяют зафиксировать следующую хронологию событий по камчатскому времени в дополнение к моменту землетрясения и дате начала извержения вулкана Крашенинникова. Поскольку всюду ранее даты съёмок приводились по времени UTC, в хронологии ниже даты для восходящих витков остаются теми же, а для нисходящих сдвигаются на 1 день вперёд.

30 июля около полудня — землетрясение с эпицентром в 150 км к юго-востоку от Петропавловска-Камчатского.

Вечер 30 июля — заметных смещений на вулкане нет (см. *рис. 3а*).

Утро 1 августа — заметных смещений на вулкане нет (см. *рис. 3б*).

Утро 2 августа — зафиксированы первые подвижки, охватывающие всю поверхность вулкана, проекция на линию обзора нисходящего витка составляет от -12 до $+22$ см (см. *рис. 3в*). Учитывая предыдущий пункт, произошли в течение предшествующих суток.

Раннее утро 3 августа — начало извержения.

Вечер 5 августа — зафиксированы максимальные за весь период смещения на всей поверхности вулкана, проекция на линию обзора восходящего витка составляет от -50 до $+68$ см (суммарно с вечера 30 июля, но, так как до утра 1 августа подвижек не наблюдалось, изменения произошли между утром 1 августа и вечером 5 августа, наиболее вероятно — между 1 и 3 августа, см. *рис. 4а*). Зафиксировано вытекание лавы: главный поток на северном склоне и два боковых на восточном (картина, близкая к *рис. 9в*).

6–7 августа — максимальные подвижки ещё с трёх трасс, вероятнее всего, также произошли между 1 и 3 августа (см. *рис. 4а–в*). Продвижение лавовых потоков по склону.

Утро 8 августа — смещения от -7 до $+5$ см в проекции на восходящий виток на небольшой площади вокруг верхней части основного лавового потока, произошли между вечером 6 августа и утром 8 августа (см. *рис. 10а*).

После 8 августа заметных площадных смещений на вулкане нет, происходит медленное продвижение лавовых потоков (см., например, *рис. 9в*) вплоть до конца сентября, что свидетельствует о продолжающемся извержении.

Заключение

Интерферометрические измерения подвижек поверхности в районе вулкана Крашенинникова позволяют охарактеризовать величины смещения, произошедшие в результате извержения, как направленные радиально от условного центра, величиной не менее 70 см в каждую сторону, т. е. жерло вулкана расширилось на величину около полутора метров или более, поскольку вследствие декорреляции и слипания интерференционных полос вблизи вершин вулкана имеет место недооценка величин смещений. При этом зафиксировано локальное выдавливание вверх участка поверхности кольцеобразной формы, вертикальная деформация достигает максимальных значений 31 см на расстоянии 2,8 км к юго-западу от кромки северного кратера, а наименее выражено это поднятие на восточном склоне вулкана. На местности образовавшийся вал не может быть визуализирован, поскольку имеет плавно спадающий в обе стороны поперечный профиль, ширина которого достигает сотен метров, что при высоте 0,3 м и расположении на склоне сильно затрудняет обнаружение.

На север из северного кратера между 1 и 5 августа вытек поток лавы длиной около 2,2 км и шириной до 650 м в нижней части. Также зафиксировано два узких потока лавы на восточном склоне, каждый длиной около 2 км. В области вокруг северного потока отмечена просадка поверхности величиной до 16 см. На конец сентября 2025 г. продолжает изменяться конфигурация лавовых потоков, что говорит о том, что извержение продолжается.

Работа выполнена в рамках госзадания Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН.

Литература

1. *Гирина О. А., Мельников Д. В., Романова И. М. и др.* Первое историческое извержение вулкана Крашенинникова (Камчатка) в 2025 г. по данным спутникового мониторинга в информационной системе VolSatView // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 4. С. 397–404. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-397-404.
2. *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. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.02.005.
3. *Kenyi L. W., Kaufmann V.* Estimation of rock glacier surface deformation using SAR interferometry data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2003. V. 41. No. 6. P. 1512–1515. DOI: 10.1109/TGRS.2003.811996.
4. *Massonnet D., Rossi M., Carmona C. et al.* The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry // Nature. 1993. V. 364. No. 8. P. 138–142. DOI: 10.1038/364138a0.
5. *Qiu Y., Wang Y., Cui X. et al.* Unstable slope identification and monitoring using polarization-enhanced DS-InSAR: A case study in the Bailong River Basin // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2025. V. 18. P. 11142–11154. DOI: 10.1109/JSTARS.2025.3561337.
6. *Solaro G., Bonano M., Castaldo R. 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 Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 2019. P. 9702–9704. DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8899191.

7. Strozzi T., Tosi L., Teatini P. et al. Monitoring land subsidence within the Venice Lagoon with SAR interferometry on Trihedral Corner Reflectors // IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 2009. P. IV-33–IV-36. DOI: 10.1109/IGARSS.2009.5417602.
8. Tessari G., Puliero S., Atzori S. et al. 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 Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 2020. P. 6838–6841. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324709.

Observation of the deformation of Krasheninnikov volcano slopes after eruption in August 2025 using InSAR techniques

L. N. Zakharova, A. I. Zakharov

*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch
Fryazino, Moscow Region 141190, Russia
E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru*

A series of Sentinel-1 SAR interferometric image pairs covering the period from the end of July to the end of August 2025 were used to measure for the first time in the history of observations the small-scale surface displacements on the slopes of Krasheninnikov volcano and to describe their dynamics caused by the eruption started on August 3. The components of vertical and horizontal displacements were extracted from a combination of surface displacement measurements along slant range directions from radar to scattering surface being acquired from eastern and western sides. It was found that the active surface deformations began 1–2 days before the eruption, shortly after the earthquake. An interpretation of the observed displacement components is proposed: a radially symmetric deformation geometric model. According to this model, the measured displacements indicate a horizontal expansion of the volcano's vent by at least one and a half meters. The vertical displacement zones are insignificant in the area and have maximum amplitude of approximately 31 cm. A 16 cm subsidence zone on the northern slope occurred likely as a result of the formation of underground cavity because of the lava outflow. The path of the lava stream and its dynamics were also traced in the interferograms and interferometric coherence maps.

Keywords: synthetic aperture radar interferometry, surface displacements, eruption, Krasheninnikov Volcano

Accepted: 13.11.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-400-411

References

1. Girina O. A., Melnikov D. V., Romanova I. M. et al., The first historical eruption of Krasheninnikov volcano (Kamchatka) in 2025 according to satellite monitoring in the VolSatView information system, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 4, pp. 397–404 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-397-404.
2. 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, pp. 1–17, DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.02.005.
3. Kenyi L. W., Kaufmann V., Estimation of rock glacier surface deformation using SAR interferometry data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2003, V. 41, No. 6, pp. 1512–1515, DOI: 10.1109/TGRS.2003.811996.
4. Massonnet D., Rossi M., Carmona C. et al., The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 1993, V. 364, No. 8, pp. 138–142, DOI: 10.1038/364138a0.
5. Qiu Y., Wang Y., Cui X. et al., Unstable slope identification and monitoring using polarization-enhanced DS-InSAR: A case study in the Bailong River Basin, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2025, V. 18, pp. 11142–11154, DOI: 10.1109/JSTARS.2025.3561337.

6. Solaro G., Bonano M., Castaldo R. 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 Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2019, pp. 9702–9704, DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8899191.
7. Strozzi T., Tosi L., Teatini P. et al., Monitoring land subsidence within the Venice Lagoon with SAR interferometry on Trihedral Corner Reflectors, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2009, pp. IV-33–IV-36, DOI: 10.1109/IGARSS.2009.5417602.
8. Tessari G., Puliero S., Atzori S. et al., 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 Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2020, pp. 6838–6841, DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324709.