

УДК: 550.31

О ПРИРОДЕ ДЕФОРМАЦИЙ ЗАПАДНОГО СКЛОНА ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ ПОСЛЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ 11 АПРЕЛЯ 2023 г., ВЫЯВЛЕННЫХ МЕТОДАМИ РСА-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

© 2024 г. М. С. Волкова^{1,*}, член-корреспондент РАН В. О. Михайлов¹, Н. В. Горбач²

Поступило 20.05.2024 г.

После доработки 29.05.2024 г.

Принято к публикации 29.05.2024 г.

По снимкам спутника Sentinel-1A, выполненным в период с 1 мая по 22 сентября 2023 г., методом дифференциальной интерферометрии (DInSAR) рассчитаны последовательные во времени поля смещений, на которых чётко проявляется подъём куполообразной формы на западном склоне вулкана Шивелуч, в 8–8.5 км к западу от его активного кратера. Особенно интенсивно поднятие росло на интервалах спутниковой съёмки 01.05–13.05.2023, 13.05–25.05.2023 и 25.05–06.06.2023. Для проверки гипотезы о формировании области поднятия в результате внедрения магмы под западный склон вулкана было проведено численное моделирование и определены параметры магматического тела в форме силла, которое создаёт на поверхности смещения, наилучшим образом соответствующие смещениям, наблюдаемым по данным спутниковой радарной интерферометрии. Предполагается, что после извержения 11.04.2023 магма поднялась с глубины 20–25 км по образовавшейся под западным склоном вулкана трещине и внедрилась горизонтально под склон на глубине 1–2 км в ССЗ-направлении. В пределах точности данных о смещениях склона, размеры магматического тела меняются от 6.0×3.0 км на глубине 1 км, до 5.25×1.4 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 км³. Таким образом, на основе данных радарной интерферометрии в комплексе с данными о распределении сопровождавшей движение магмы сейсмической активности, построена модель магматического тела, внедрившегося под западный склон вулкана Шивелуч в постпароксизмальную фазу извержения 11.04.2023. Формирование в конце апреля 2024 г. на западном склоне вулкана Шивелуч нового экструзивного купола подтверждает гипотезу о подъёме магматического материала под западный склон вулкана и позволяет оценить скорость подъёма магмы к поверхности.

Ключевые слова: спутниковая радарная интерферометрия, вулкан Шивелуч, Камчатка, извержение 11.04.2023, численная модель, силл

DOI: 10.31857/S2686739724100135

ВВЕДЕНИЕ

Вулкан Шивелуч — наиболее активный эксплозивный центр полуострова Камчатка [5, 11, 18], расположенный к западу от стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг (рис. 1). В историческую эпоху было зафиксировано два катастрофических извержения в 1854

и в 1964 годах [5], а за последние 10 тыс. лет на вулкане произошло не менее 60 крупных пароксизмальных извержений, связанных со значительным выбросом пепловых облаков, образованием мощных пирокластических потоков и обломочных лавин [18]. Из-за частых эксплозивных событий Шивелуч представляет опасность не только для окрестных населённых пунктов (Ключи, Усть-Камчатск, расположенные в 45 и 85 км соответственно). Во время крупных извержений его пепловые облака поднимаются на высоту до 20 км и легко переносятся на большие расстояния, очевидно представляя опасность для проходящих

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Российской Академии наук, Москва, Россия

²Институт вулканологии и сейсмологии,
Дальневосточное отделение Российской Академии наук,
Петропавловск-Камчатский, Россия

*E-mail: msvolkova6177@gmail.com

в непосредственной близости от Камчатки международных авиалиний.

Мощное извержение, которое произошло 11 апреля 2023 года, стало сильнейшим в числе извержений вулкана за последние 60 лет. По разным оценкам эруптивная колонна достигла стратосферы, поднявшись на высоту от 15 до 20 км [3, 6]. Пирокластические потоки распространились на расстояние до 19 км от эруптивного центра, а мощность пепла, выпавшего в поселке Ключи, достигла 8 см. По данным работы [3], площадь территории Камчатки и Тихого океана, на которой были зафиксированы пепловые и аэрозольные шлейфы и облака, составила около 3280 тыс. км², а через десять дней после извержения аэрозольное облако вулкана Шивелуч достигло Скандинавского п-ова.

На полуострове Камчатка и прилегающих островах развернута сеть непрерывного мониторинга сейсмических и вулканических событий, которая включает стационарные и временные пункты глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), сейсмические станции, веб-камеры и т.д. Большой вклад в проведение мониторинга вносят спутниковые технологии, которые позволяют получать информацию дистанционно, регулярно и на больших территориях. В частности, для исследования вулканических процессов и их последствий на территории Камчатки широко применяется спутниковая радарная интерферометрия (например, [2, 13–15] и т.д.).

В настоящей работе представлены данные спутниковой радарной интерферометрии, которые позволили выявить изменения рельефа земной поверхности на западном склоне вулкана Шивелуч вскоре после пароксизмального извержения в апреле 2023 г. Область смещений расположена в 8–8.5 км к западу от его активного кратера, вблизи группы экструзий Каран, предшествующая активность которых была зафиксирована около 1.5–2 тыс. лет назад [4, 18]. Результаты анализа сейсмичности и численного моделирования позволили обосновать процессы внедрения и подъёма магмы под западным склоном вулкана и определить параметры магматического тела.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Спутниковые системы, оснащённые радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА, SAR) — это активные системы дистанционного зондирования Земли, которые выполняют

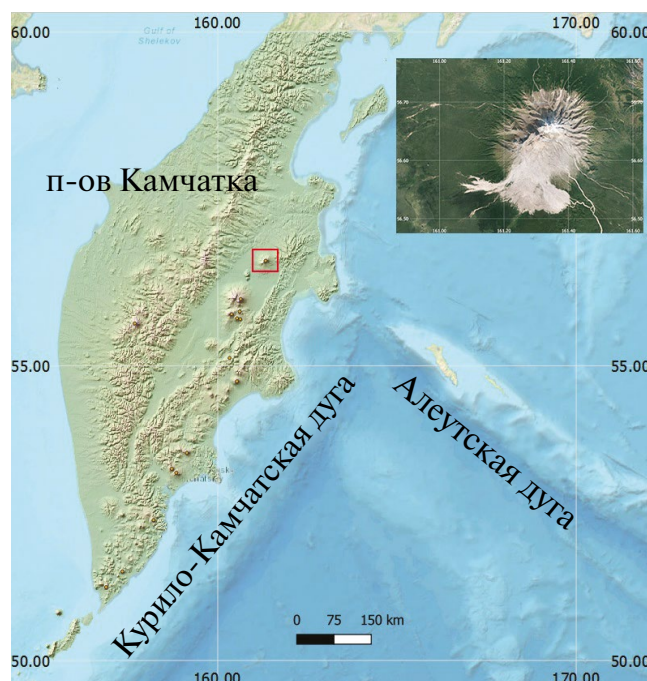


Рис. 1. Район исследований. Вулкан Шивелуч обозначен красным прямоугольником на карте полуострова Камчатка. На врезке вид вулкана на карте GoogleMaps.

съёмку земной поверхности в любое время суток, независимо от освещённости и погодных условий. Спутниковая система излучает электромагнитный сигнал в определённом диапазоне длин волн и регистрирует обратно отражённый сигнал, формируя радиолокационное изображение, которое содержит информацию об амплитуде и фазе отраженного сигнала. В основе методов радарной интерферометрии лежит анализ разности фаз электромагнитного сигнала, отражённого от одних и тех же объектов на поверхности Земли при повторной съёмке. Разность фаз содержит информацию о смещениях отражающих объектов на земной поверхности за время между съёмками, и также различного рода помехи, которые следует устранить для выделения деформационной компоненты. Получаемые при этом смещения являются проекцией вектора смещений отражающего объекта на линию распространения радиолокационного сигнала спутника (line of sight — LOS).

Получить информацию о смещениях по двум радарным снимкам можно только при наличии когерентности фазовых составляющих этой пары изображений. Когерентность характеризует согласованность фаз отражённых сигналов двух снимков, по которым рассчитывается интерферограмма. Потеря когерентности (или

декорреляция) может быть вызвана значительными изменениями отражающей способности элемента поверхности за время между съёмками (появление снежного покрова, появление густой растительности, резкое изменение рельефа и т.д.).

Существуют различные методы обработки фазовых изображений. Часто, чтобы выявить смещения поверхности, произошедшие за конкретный период времени, достаточно рассчитать интерферограмму по двум снимкам методом дифференциальной интерферометрии DInSAR (differential interferometric SAR). Однако, чтобы проследить за динамикой смещений во времени, используют более эффективные, но и более трудозатратные методы, такие как метод малых базовых линий SBaS (Small BAse line Subsets), различные модификации методов, основанных на поиске устойчиво отражающих объектов. Выбор того или иного метода расчёта поля смещений зависит от цели исследований, а также от наличия условий, благоприятных для применения конкретного метода, в том числе достаточно длинной серии спутниковых снимков и их качества.

В настоящей работе мы использовали метод дифференциальной интерферометрии (DInSAR). По 13-ти снимкам спутника Sentinel-1A Европейского космического агентства, выполненным с восходящей орбиты 140A в период с 01.05 по 22.09.2023, были рассчитаны поля смещений на район вулкана Шивелуч. Спутник Sentinel-1A проводит съёмку в С-диапазоне с длиной волны $\lambda = 56$ мм, с интервалом 12 дней. К сожалению, декорреляция снимков в более ранний период не позволила выполнить интерферометрическую обработку снимков до и во время извержения. В таблице 1 приведён список пар снимков с указанием даты съёмки, по которым были построены интерферограммы.

На этапе расчёта интерферограмм проводилось осреднение пикселей по направлению, перпендикулярному орбите, так, что пространственное разрешение пикселя составило $\sim 9 \times 14$ м. Развёртка фазового изображения выполнялась алгоритмом “потока минимальной стоимости” (minimum cost flow), но, в зависимости от площади некогерентных областей, для каждой интерферограммы отдельно выбиралась регулярная или триангуляционная сетка развёртки. Существенные проблемы для метода дифференциальной интерферометрии создают атмосферные помехи, которые бывает трудно отделить от компоненты смещений. В работе [1]

Таблица 1. Даты съёмки снимков, составивших 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

исследовалась эффективность применения данных онлайн сервиса GACOS (Global Atmospheric Corrections Online Service [20]) на основе глобальной погодной модели HRES (High RESolution) для коррекции атмосферных помех в интерферометрических оценках полей смещений в специфических условиях Камчатского региона. Было показано, что поправка GACOS во многих случаях эффективно учитывала тропосферные эффекты, часто проявляющиеся на горном рельефе, но практически не устраняла турбулентную составляющую. Несмотря на это, в отдельных случаях среднеквадратическое отклонение поля смещений было уменьшено в два раза. В данной работе для устранения атмосферных помех на парных интерферограммах мы также применили модель атмосферы GACOS и получили относительное изменение дисперсии поля смещений от 12 до 41% для пар снимков 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%).

Далее была вычислена карта суммарных смещений U_{los} за период времени с 01.05 по 17.08 2023 г. После 17 августа площадь когерентной области на западном склоне существенно уменьшается. Для интерферограмм, на которых выявлены заметные поднятия на западном склоне, область деформаций можно ограничить окружностью радиусом в 3 км (рис. 2), в пределах которой суммарные максимальные смещения на спутник (в направлении LOS) за указанный период времени превышают 0.4 м.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Для интерпретации полученных результатов важно то, что на всех полях смещений, рассчитанных отдельно на каждом временном интервале, в окрестности области положительных смещений (поднятий склона) отсутствуют сопоставимые по площади области отрицательных значений (оседаний). Следовательно, для поля смещений, наблюдаемого в выделенном

контуре на рис. 2, можно исключить преобладающее участие оползневых или эрозионных процессов. Немного севернее прослеживается область с отрицательными смещениями, но она расположена топографически ниже, чем область, обозначенная контуром. Перемещение материала поверхностными процессами (оползни, снос водными потоками) должно происходить вниз по склону, т.е. согласно рельефу — в северо-западном направлении от выделенного контура. Это позволяет заключить, что поверхностные процессы играли второстепенную роль.

Движение магмы обычно сопровождается сейсмическими событиями. Рассмотрим распределение сейсмических событий в период мониторинга смещений.

По данным сейсмических каталогов КФ ФИЦ ЕГС РАН [7, 8] за период с 01.04 по 31.10.2023 г., основная сейсмическая активность фиксировалась в апреле–мае, а затем в конце августа (фиолетовые и жёлтые точки, соответственно на рис. 3 А). На рис. 3 Б показаны проекции всех гипоцентров на горизонтальную плоскость.

Эпицентры преимущественно концентрируются вдоль некоторой вытянутой области, через которую на рис. 3 Б проведён профиль, обозначенный L. В то же время, значительная часть событий попадает в область, где формировалось поднятие куполообразной формы, выявленное по интерферометрии. На рис. 3 В показаны проекции гипоцентров на вертикальную плоскость, проходящую через линию L. Распределение гипоцентров землетрясений, ассоциированное с миграцией магмы на рис. 3 В, показывает, что магма поднималась с глубин 20–25 км в верхний горизонт, расположенный на глубине выше 5 км. На рис. 3 Г — показаны эпицентры с глубиной менее 15 км, время сейсмических событий показано цветом: синие точки — апрель, зелёные точки — май. Чёрная стрелка показывает направление миграции сейсмических событий в верхнем горизонте. Видно, что миграция сейсмической активности происходила в мае по направлению к центру области смещений на дневной поверхности.

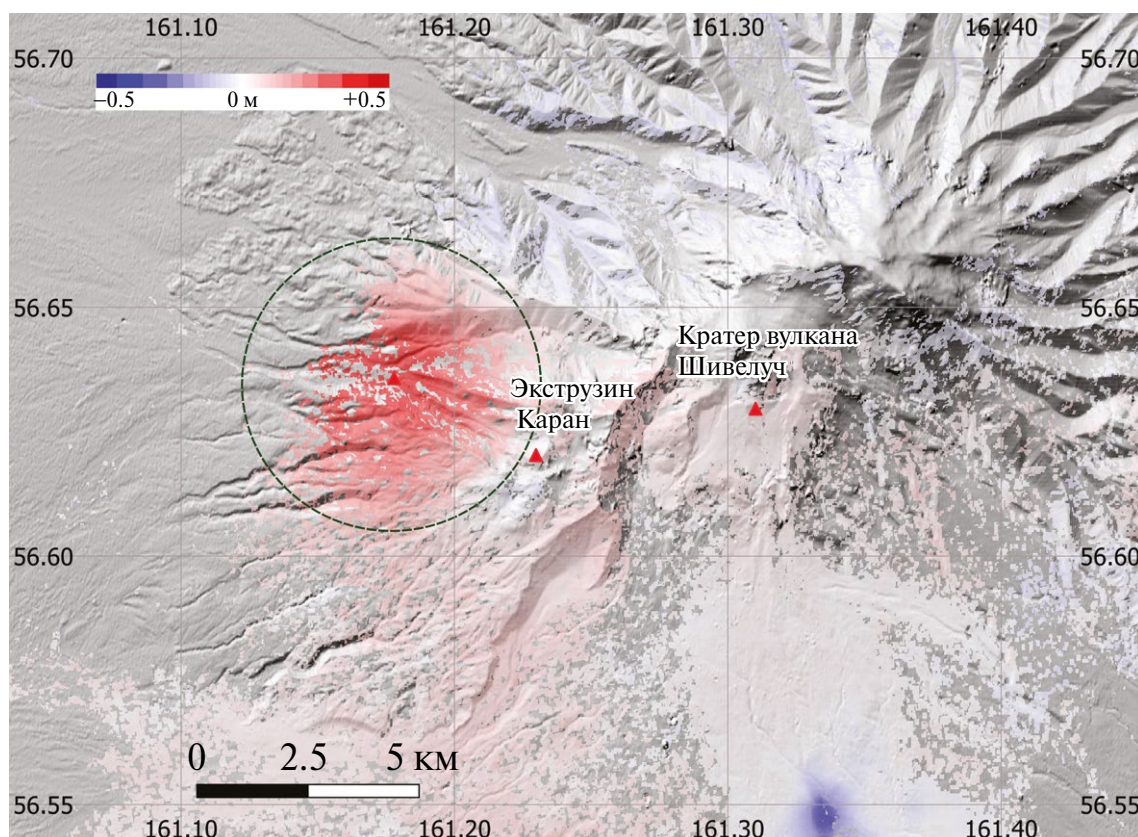


Рис. 2. Суммарные смещения U_{LOS} (м) за период с 1.05 по 17.08.2023. Чёрным контуром выделена область наиболее активных смещений, определённая по РСА-интерферометрии. Треугольниками показана позиция активного кратера вулкана Шивелуч и экструзий группы Каран

Таким образом, наблюдаемое распределение сейсмических событий согласуется с гипотезой о миграции магмы под западный склон вулкана Шивелуч. В частности, в работе [6] сообщается, что после пароксизмальной фазы извержения рой сильных землетрясений к западу от активного кратера сопровождался образованием трещин в районе экструзии Каран (показан на рис. 2). Данные о глубинах гипоцентров землетрясений также хорошо соответствуют имеющимся петрологическим данным о строении питающей магматической системы вулкана. Так, в работах [10, 11] показано, что под вулканом могут существовать несколько уровней накопления магмы — в пределах малоглубинной магматической

камеры на глубине $\sim 5\text{--}6$ км и в промежуточном очаге ($\sim 15\text{--}20$ км).

На основе проведённого анализа данных спутниковой интерферометрии и развития сейсмической активности во времени, а также с учётом имеющихся петрологических данных о строении питающей системы вулкана, нами была сформулирована рабочая гипотеза, согласно которой подъём магмы с глубин 20–25 км к экструзиям группы Каран и также к кратеру вулкана мог привести к образованию горизонтальной трещины в север–северо-западном направлении на отметках глубин от 5 км или выше. В открывшуюся трещину происходило внедрение магмы с образованием магматического тела, морфология которого близка силлу, что привело

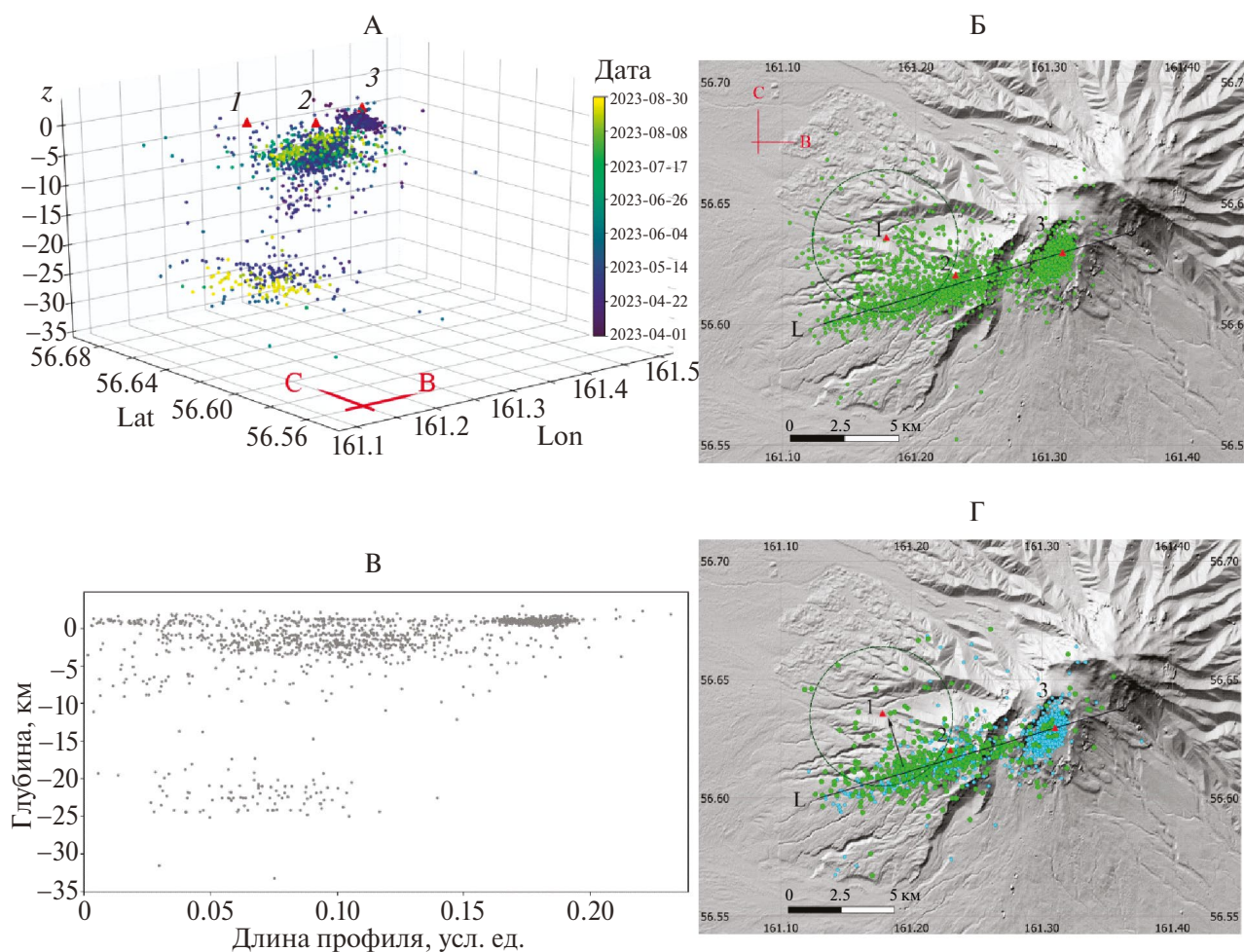


Рис. 3. А — распределение гипоцентров по глубине и по времени с 1 апреля по 31 августа 2023 г., Б — проекции всех гипоцентров на горизонтальную поверхность, В — проекции гипоцентров на профиль L (запад — восток). Длина профиля равна ~ 15 км, Г — распределение эпицентров за апрель–май 2023 г., глубина < 15 км. Цифрами обозначены центр смещений (1), экструзии Каран (2), кратер вулкана (3). Прямая линия — профиль L. Чёрной стрелкой на рис. Г показано направление миграции сейсмических событий в верхнем горизонте.

к формированию поднятия поверхности западного склона вулкана площадью примерно $6 \times 6 \text{ км}^2$. Для проверки этой гипотезы и определения параметров магматического тела, было выполнено численное моделирование процесса формирования силла, параметры которого определены из условия наилучшего согласования с данными РСА-интерферометрии.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Решение задачи о деформации поверхности полупространства, ограниченного плоской поверхностью, при изменении давления в расположенной в нём сферической полости малого диаметра (так называемая модель Моги, [16]), часто используется для описания вулканических процессов. Это решение позволяет рассчитать три компоненты вектора смещений на поверхности полупространства:

$$\begin{aligned} U_x &= (1 - \nu) \frac{\Delta P a^3}{G} \frac{(\xi - x)}{R^3}, \\ U_y &= (1 - \nu) \frac{\Delta P a^3}{G} \frac{(\eta - y)}{R^3}, \\ U_z &= (1 - \nu) \frac{\Delta P a^3}{G} \frac{(z - d)}{R^3} \end{aligned} \quad (1)$$

где ν — коэффициент Пуассона, ΔP — изменение давления в сферической полости радиуса a , z — аппликата свободной поверхности, d — глубина расположения источника, G — модуль сдвига, R — евклидово расстояние в декартовой системе координат от расчётной точки (x, y, z) до источника (ξ, η, d) , $R = \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (z - d)^2}$. Ось Z направлена вверх, Y — на север, X — на восток.

Параметры ΔP и a^3 в (1) неразделимы, поэтому расширение сферической полости можно заменить на изменение её объёма: $\Delta P a^3 = G \Delta V / \pi$ [17]. Тогда три компоненты вектора смещений на свободной поверхности будут равны:

$$\begin{aligned} U_x &= \frac{(1 - \nu)(\xi - x)}{\pi R^3} \Delta V, \\ U_y &= \frac{(1 - \nu)(\eta - y)}{\pi R^3} \Delta V, \\ U_z &= \frac{(1 - \nu)(z - d)}{\pi R^3} \Delta V. \end{aligned} \quad (2)$$

Теперь решение зависит только от изменения объёма сферической полости. Условие сферичности не позволяет перейти к интегрированию

дислокации на сетке с параллелепипедными элементами. В работе [9] показано, что модель расширяющейся сферической полости эквивалентна модели с тремя взаимно перпендикулярными дислокациями, в которой ΔV следует заменить следующим выражением:

$$\Delta V = Ah \frac{3K}{K + G \frac{4}{3}} \quad (3)$$

Здесь K — модуль всестороннего сжатия, h — раскрытие дислокации, A — дифференциал площади $dxdy$. Подставив (3) в (2), полагая $\nu = 0.25$, откуда $K = 5/3G$, получим формулы для компонент смещений в каждой точке площадки:

$$\begin{aligned} U_z &= A \frac{5h}{4\pi} \frac{(z - d)}{R^3}, \\ U_x &= A \frac{5h}{4\pi} \frac{(\xi - x)}{R^3}, \\ U_y &= A \frac{5h}{4\pi} \frac{(\eta - y)}{R^3}. \end{aligned} \quad (4)$$

По формулам (4) поле смещений зависит от глубины расположения дислокации (d), её раскрытия (h) и площади площадки (A).

Предположим, что горизонтальная трещина, заполненная магмой, расположена в плоскости, параллельной горизонтальной координатной плоскости XY . Аппроксимируем сформировавшуюся интрузию тонким параллелепипедом ($h \ll d$), стороны которого также параллельны координатным осям X и Y , а координаты сторон меняются от ξ_1 до ξ_2 по оси X и от η_1 до η_2 по оси Y .

Проинтегрировав уравнения (4) по площади в пределах $[\xi_1, \xi_2]$ и $[\eta_1, \eta_2]$ получим окончательные выражения для каждой компоненты смещений:

$$\begin{aligned} U_z &= C \left[\arctg \left(\frac{(\xi - x)(\eta - y)}{R(z - d)} \right) \right]_{\xi_1 \eta_1}^{\xi_2 \eta_2} \\ U_x &= C \left[-\ln(R + (\eta - y)) \right]_{\xi_1 \eta_1}^{\xi_2 \eta_2} \\ U_y &= C \left[-\ln(R + (\xi - x)) \right]_{\xi_1 \eta_1}^{\xi_2 \eta_2} \end{aligned} \quad (5)$$

где коэффициент $C = \frac{5h}{4\pi}$, а квадратные скобки подразумевают последовательную подстановку пределов интегрирования.

Для сопоставления численного решения с наблюдаемыми смещениями по РСА-интерферометрии, компоненты решения (5) необходимо пересчитать в смещения на спутник (LOS).

Смещения, регистрируемые спутником при съёмке с восходящей орбиты U_{LOS}^{asc} , в проекции на линию распространения электромагнитного сигнала равны [12]:

$$U_{LOS}^{asc} = U_z \cos(\theta) - \sin(\theta) (U_y \cos(\beta - 3\pi/2) + U_x \sin(\beta - 3\pi/2)) \quad (6)$$

где β — азимут восходящей орбиты спутника Sentinel-1A, который составляет 349° , θ — угол отклонения от надира излучения электромагнитного сигнала, который для исследуемой территории равен примерно 40° (в вычислениях используется реальный угол для каждой площадки).

ПОДБОР ПАРАМЕТРОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Мы рассмотрели постановку задачи в рамках модели о деформации плоской свободной поверхности. Однако, в случае неглубокого источника деформаций, тем более расположенного под вулканической постройкой, важным фактором является топография, которая может заметно влиять на величины смещений, даже если средний уклон склонов вулканической постройки меньше 10° [19]. Западный склон вулкана Шивелуч в области смещений имеет угол наклона вдоль профиля А–А1 $\sim 9^\circ$ (рис. 5Б). Для учёта топографии мы используем переменную глубину источника, задав в (5) вместо z значения расстояния до реального рельефа местности.

В решении (5), свободными параметрами модели являются глубина залегания интрузивного тела — d , координаты его центра (x_0, y_0) , и линейные размеры аппроксимирующего интрузивное тело параллелепипеда: l — длина вдоль оси X, w — ширина, вдоль оси Y, h — высота, измеряемая вдоль оси Z, соответствующая раскрытию трещины. Координаты центра интрузии (x_0, y_0) были смещены относительно центра окружности области деформаций вдоль простирания восток–запад с учётом влияния топографии. Для различных глубин d выполнялся автоматический подбор параметров (l, w, h) с использованием критерия минимума невязки решения (r) по ∞ -норме, при этом учитывались также стандартное отклонение численного решения от РСА-данных и средние значения невязок (табл. 2). Напомним, что ∞ -норма является одной из наиболее употребимых в вычислительных методах и задаётся формулой $\|r\|_\infty = \max_i |r_i|$. (i — ячейки сетки дискретизации модели).

Задача определения параметров трещины (l, w, h) путём минимизации невязки между измеренным и рассчитанным по формулам (5), (6) полем смещений имеет единственное решение, но в пределах точности данных о смещениях имеются эквивалентные модели с различными параметрами и объёмом магматической интрузии. Например, в таблице 2 в моделях М1, М2 и М3 интрузии располагаются на глубинах 1, 1.5, 2 км соответственно, со средним значением невязки 2.7 см. В соответствии с изменением геометрических параметров интрузии и увеличением её глубины от 1 до 2 км, объём возрастает от 0.009 до 0.0129 км³. При расположении интрузии ниже 2 км невязка начинает расти и расхождение решения с исходным полем смещений становится существенным (табл. 2, модели М4, М5). На рис. 4 в верхнем ряду показаны поля смещений, рассчитанные по моделям М1, М2, М3. Они хорошо согласуются с реальным полем смещений, полученным по спутниковым данным. В нижнем ряду рис. 4 показаны невязки, соответствующие этим моделям. В области смещений невязки в основном имеют значения близкие к нулю (на рисунках преобладает синий цвет). Высокие расхождения невязок (жёлтые и красные оттенки) находятся за пределами исследуемой области и связаны с процессами, не включёнными в нашу модель. На рис. 5 В и Г показано сопоставление численных моделей и реального поля смещений вдоль профилей в направлении запад–восток (А–А1) и север–юг (В–В1) соответственно.

Как уже было сказано, модели М1–М3, отличающиеся параметрами, дают очень близкие результаты (рис. 4). Можно было бы уменьшить невязки путём усложнения модели, например, аппроксимировать силл несколькими параллелепипедами, но достигнутая в моделях точность подбора вполне соответствует точности оценки смещений на горном рельефе и точности описания реального процесса простой математической моделью расширяющейся трещины. Действительно, математическая модель построена для однородного упругого полупространства с плоской свободной поверхностью, с введением фиктивного зеркального источника, для выполнения условий на свободной поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью методов радарной интерферометрии была выявлена обширная область куполообразного поднятия на западном склоне вулкана Шивелуч в постпароксизмальную фазу извержения 11.04.2023 г. Область основных смещений по

Таблица 2. Параметры моделей и соответствующие им статистики невязок (стандартное отклонение $\sigma(r)$ и среднее $m(r)$)

	D, км	L, км	W, км	H, м	V, км ³	$\sigma(r)$, м	$m(r)$, м
M1	1	6	3	0.5	0.0090	0.02	0.027
M2	1.5	5.55	1.25	1.5	0.0104	0.02	0.027
M3	2	5.25	1.4	1.75	0.0129	0.022	0.027
M4	2.5	5.25	2.45	1.25	0.0161	0.026	0.034
M5	3	5.35	2.05	1.75	0.0192	0.029	0.038

площади имеет диаметр более 6 км, а сами смещения достигли величины почти 0.5 м в направлении на спутник. Сопоставление положения поля смещений на склоне с топографией склона показало, что наблюдаемые смещения не могут быть вызваны перемещением материала по склону в результате оползневых или эрозионных процессов.

Анализ полей смещений совместно с данными о миграции сейсмических событий по глубине и во времени позволил заключить, что зарегистрированные смещения, вероятнее всего, связаны с внедрением магмы под западный склон вулкана по открывшейся в период подготовки извержения или во время извержения трещине.

Представленная в работе численная математическая модель с параметрами, выбранными из условия наилучшей аппроксимации спутниковых данных, подтверждает эту гипотезу. Построенная модель позволила оценить размеры интрузии, её мощность и глубину. В пределах точности данных о смещениях склона, размеры магматического тела меняются от $6.0 \times 3.0 \text{ км}^2$ на глубине 1 км, до $5.25 \times 1.4 \text{ км}^2$ на глубине 2 км, при этом его мощность составляет от 0.5 до 1.75 м, а объём от 0.009 до 0.0129 км³.

Полученные результаты показывают, что после пароксизмальной фазы извержения вулкана Шивелуч в апреле 2023 г., в его питающей системе в течение нескольких месяцев

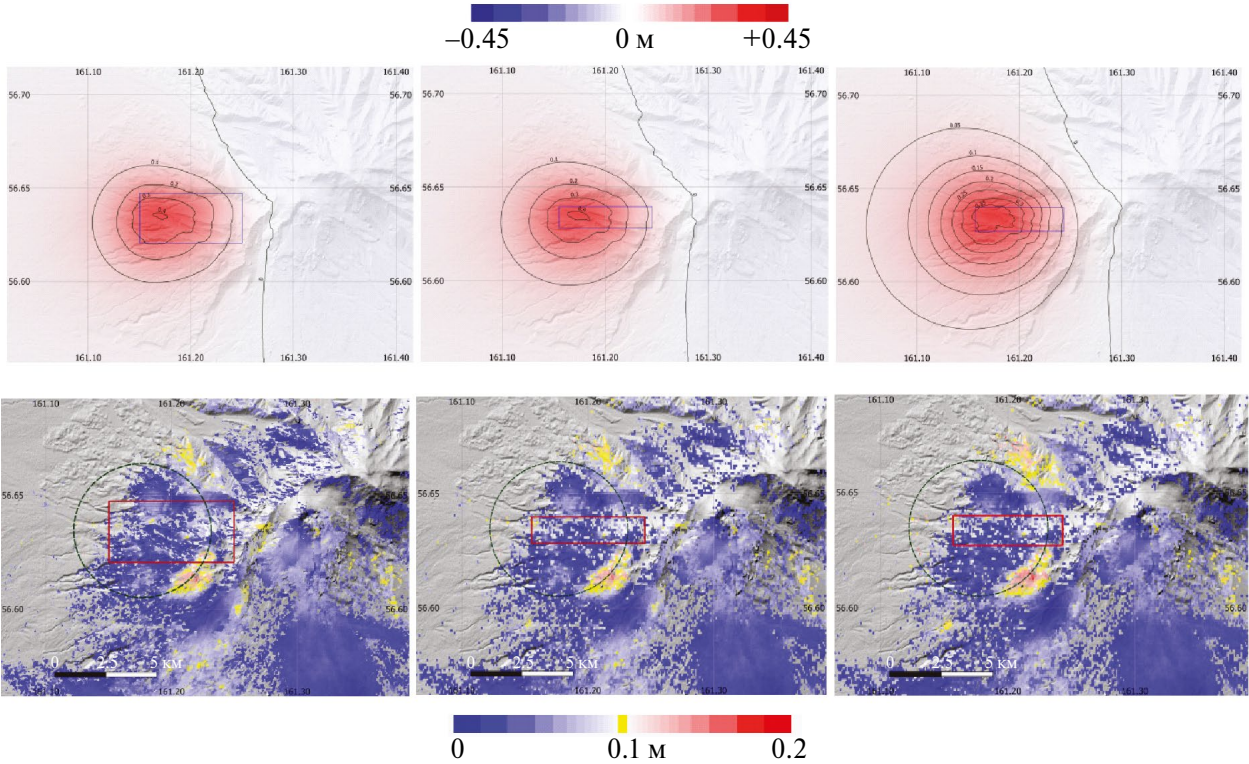


Рис. 4. Вверху — смещения, рассчитанные по моделям M1, M2, M3. Внизу — невязка между расчётным и наблюдаемым полями смещений. Прямоугольный контур — проекция интрузии на горизонтальную плоскость.

продолжался активный подъём магмы к поверхности. На момент завершения статьи сотрудниками Камчатской группы реагирования на вулканические извержения (КВЕРТ) была предоставлена информация о появлении нового лавового купола в районе группы экстрезий Каран (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/volc?lang=en&name=Sheveluch>). Появление нового купола на дневной поверхности было зафиксировано 26 апреля 2024 г., спустя год после установленного в данной работе начала деформаций западного склона вулкана Шивелуч. Таким образом, полученные нами данные представляют исключительно важную информацию для оценки скорости подъёма магмы к поверхности и понимания динамики магматических процессов в питающей системе крупного эксплозивного вулкана.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>). Авторы благодарят

Европейское космическое агентство за предоставленные спутниковые радарные снимки.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волкова М. С., Михайлов В. О., Османов Р. С., Анализ эффективности применения глобальной погодной модели HRES (GACOS) для коррекции атмосферных помех в интерферометрических оценках полей смещений на примере вулканов Камчатки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 9–22. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-2-9-22>
2. Волкова М. С., Михайлов В. О., Османов Р. С., Интерпретация полей смещений на склонах вулкана

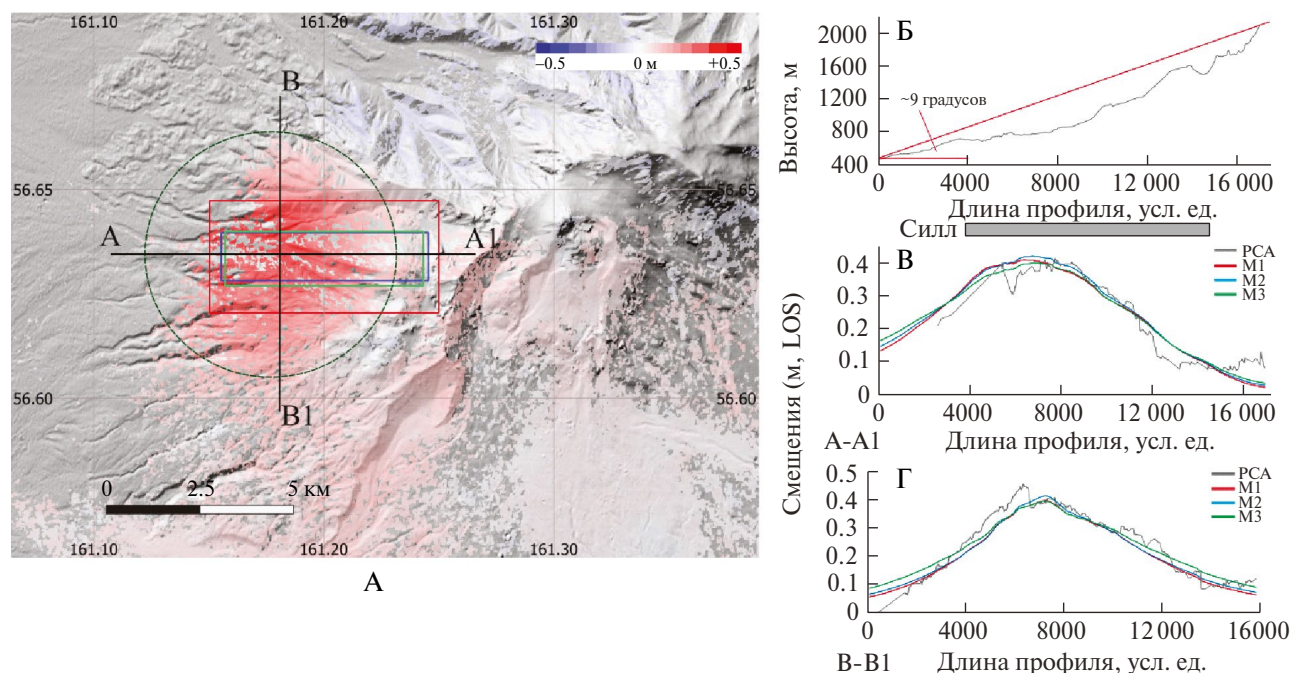


Рис. 5. А — поле смещений по спутниковым данным с проекциями интрузии в моделях M1, M2, M3 (красный, синий, зелёный цвет соответственно). Б — профиль рельефа вдоль линии А–А1 на рис. 5 А; В, Г — сопоставление исходного поля смещений (серая линия) с расчётными смещениями по моделям M1, M2, M3 (соответственно красная, синяя и зелёная линии) вдоль профилей А–А1 (В) и В–В1 (Г), обозначенных на рис. 5 А.

- Шивелуч (Камчатка), полученных по спутниковым радарным снимкам с двух орбит // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 109–119. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-5-109-119>
3. *Гурина О. А., Луян Е. А., Хорват А., Мельников Д. В., Маневич А. Г., Нурждаев 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. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291>
 4. *Горбач Н. В., Портнягин М. В.* Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч // Петрология. 2011. Т. 19. № 2. С. 140–172.
 5. *Мелекесцев И. В., Волинец О. Н., Ермаков В. А., Кирсанова Т. П., Масуренков Ю. П.* Вулкан Шивелуч / Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. Т. 1. Отв. ред. Федотов С. А., Масуренков Ю. П. М.: Наука, 1991. С. 84–103.
 - Сенюков С. Л., Нуржидина И. Н., Дрознина 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.). Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2023. С. 188–192.
 6. *Чебров В. Н., Дроздин Д. В., Кугаенко Ю. А., Левина В. И., Сенюков С. Л., Сергеев В. А., Шевченко Ю. В., Яцук В. В.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология, 2013. № 1. С. 18–40. <https://doi.org/10.7868/S0203030613010021>
 7. *Чеброва А. Ю., Чепарёв А. С., Матвеев Е. А., Чебров Д. В.* Единая информационная система сейсмологических данных в камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 66–91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>
 8. *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.
 9. *Goltz A. E., Krawczynsky M. J., Gavrilenko M. G. et al.* Evidence for Superhydrous Primitive Arc Magmas from Mafic Enclaves at Shiveluch Volcano, Kamchatka // Contribution to Mineralogy and Petrology. 2020. V. 175. Art. 115. <https://doi.org/10.1007/S00410-020-01746-5>
 10. *Gorbach N. V., Filosofova T. M., Portnyagin M. V.* Amphibole Record Of 1964 Plinian And Following Dome-Forming Eruptions Of Shiveluch Volcano, Kamchatka // Journal Of Volcanology And Geothermal Research. 2020. V. 407. Art. 107108. <https://doi.org/10.1016/J.Jvolgeores.2020.107108>
 11. *Hanssen R. F.* Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 308 p.
 12. *Ji L., Lu Z., Dzurisin D., Senyukov S.* Pre-eruption deformation caused by dike intrusion beneath Kizimen volcano, Kamchatka, Russia, observed by InSAR // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. 256. P. 87–95.
 13. *Lundgren P., Kiryukhin A., Milillo P., Samsonov S.* Dike model for the 2012–2013 Tolbachik eruption constrained by satellite radar interferometry observations // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2015. V. 307. P. 79–88.
 14. *Lundgren P., Lu Z.* Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations // Geophysical Research Letters. 2006. V. 33. № 6. L06301. <https://doi.org/10.1029/2005GL025181>
 15. *Mogi K.* Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them // Bull. Earthquake Res. Inst. 1958. Univ Tokyo. 36:99–134.
 16. *McTigue D. F.* Elastic stress and deformation near a finite spherical magma body: resolution of the point source paradox // J Geophys Res. 1987. 92:12931–12940.
 17. *Ponomareva V., Kyle P., Pevzner M., Sulerzhitsky L., Hartman M.* Holocene eruptive history of Shiveluch Volcano, Kamchatka Peninsula, Russia // Geophysical Monograph Series. 2007. 263–282. <https://doi.org/10.1029/172gm19>
 18. *Williams C. A., Wadge G.* An accurate and efficient method for including the effects of topography in three-dimensional elastic models of ground deformation with applications to radar interferometry // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2000. 105(B4). 8103–8120. <https://doi.org/10.1029/1999jb900307>
 19. *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>

THE NATURE OF DEFORMATIONS OF THE WESTERN SLOPE OF SHIVELUCH VOLCANO AFTER THE ERUPTION ON APRIL 11, 2023, IDENTIFIED BY SAR INTERFEROMETRY

M. S. Volkova^{a, #}, Corresponding Member of the RAS V. O. Mikhailov^a, N. V. Gorbach^b

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

^b*Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation*

[#]*E-mail: msvolkova6177@gmail.com*

Based on Sentinel-1A satellite images acquired between 01.05 and 22.09.2023, the differential interferometry method (DInSAR) calculated successive displacement fields in time, which clearly show a dome-shaped uplift on the western slope of the Shiveluch volcano, 8–8.5 km west of its active crater. Uplift was especially intense at the satellite acquisition intervals 01.05–13.05.2023, 13.05–25.05.2023 and 25.05–06.06.2023. To test the hypothesis about formation of a displacement area due to magma injection under the western slope of the volcano, numerical modelling was carried out and parameters of magmatic body like a sill were determined, which forms the displacements on the surface that best match the displacement observed from satellite radar interferometry data. It is assumed that after the eruption on 11.04.2023 magma rose from a depth of 20–25 km through a fissure formed under the western slope of the volcano and penetrated horizontally under the slope at a depth of 1–2 km in the north-northwest direction. Within the precision of data on slope displacements, the size of the magma body varies from 6.0×3.0 km at 1 km depth, to 5.25×1.4 km at 2 km depth, while its height ranges from 0.5 to 1.75 m and its volume from 0.009 to 0.0129 km^3 . Thus, based on radar interferometry data in combination with the data on the distribution of seismic activity accompanying the magma movement, the model of the magmatic body that penetrated under the western slope of Shiveluch volcano in the postparoxysmal phase of the eruption on 11.04.2023 was constructed. The Formation of a new extrusive dome on the western slope of Shiveluch volcano at the end of April 2024 confirms the hypothesis about injection of magmatic material under the western slope of the volcano and allows to estimate the rate of magma rise to the surface.

Keywords: SAR interferometry, Shiveluch volcano, Kamchotka, eruption 11.04.2023, numerical model, sill intrusion