

## МОНИТОРИНГ ВУЛКАНИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ МЕТОДАМИ РСА ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ: ВУЛКАНЫ КАМЧАТКИ

*Волкова М.С., Михайлов В.О., Тимошкина Е.П., Османов Р.С.*

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, msvolkova6177@gmail.com*

### **Введение**

Для наблюдения и мониторинга современных геодинамических процессов в сейсмоопасных и вулканических регионах широко используются спутниковые методы дистанционного зондирования Земли, к которым относится радиолокационная интерферометрия, основанная на анализе снимков, выполненных спутниковыми радарными с синтезированной апертурой (РСА). РСА снимки выполняются вне зависимости от погодных условий и освещенности. В сумме они покрывают всю территорию п-ова Камчатка и прилегающие острова. РСА снимки позволяют исследовать современные и исторические события на основе архивных данных.

В основе методов спутниковой радарной интерферометрии лежит анализ разности фаз радиолокационного сигнала, отражённого от одних и тех же объектов на поверхности Земли при повторной съёмке. Разность фаз содержит информацию об изменениях земной поверхности за время между выполнением снимков плюс различные факторы и помехи, которые следует устранить для выделения компоненты смещений. Для расчёта поля смещений, в основном, используют два подхода: анализ наблюдений по двум снимкам (метод дифференциальной интерферометрии DInSAR) или по серии последовательных во времени снимков (например, метод малых базовых линий SmallBASelineSubsets) (см. [9, 10, 12]). Получаемые при этом смещения измеряются в проекции на линию распространения радиолокационного сигнала спутника (LOS, line of sight).

В то же время применение радарной съёмки для изучения и мониторинга вулканических районов п-ова Камчатка осложняется рядом обстоятельств. Это горный рельеф, наличие мощного снежного покрова зимой и густой растительности летом, сложные погодные условия, состояние атмосферы и т.д. Поэтому для оценки полей смещений на поверхности вулканов по спутниковым снимкам необходимо разрабатывать и применять специальные технологии. После того, как рассчитано поле смещений поверхности, основная задача выяснить, какими процессами эти смещения были вызваны. Получаемые поля смещений мы интерпретируем совместно с имеющимися геологическими и геофизическими данными с помощью численных математических моделей. Это позволяет получить количественную информацию о процессах, вызвавших деформации на поверхности склонов вулканов.

С помощью такого подхода мы исследовали разноплановые объекты, например, пирокластические и лавовые потоки (вулкан Шивелуч и вулкан Толбачик), деформации после извержения вулкана Корякский 2008 года, поведение вулкана Большая Удина в 2017 г.

### **Данные и результаты исследований**

Для исследования территории Камчатки мы использовали снимки европейского космического агентства спутника Sentinel-1A, выполненные в бесснежный период с мая по октябрь, и архивные снимки спутника ALOS, предоставленные японским космическим агентством. Для получения полей смещений применялись методы обработки как серий снимков (SBAS), так и методы обработки двух снимков (DInSAR). Для численной интерпретации полученных полей смещений построен ряд математических моделей, описывающих термические и механические процессы.

Например, наблюдения по сериям снимков спутника Sentinel-1A поверхности обширного лавового поля, которое образовалось в результате Трещинного Толбачинского извержения ТТИ-50 в 2012 году, показали неравномерность оседания поверхности лавы в 2017, 2018, 2019 годах. При этом выявлена отдельная аномальная область с высокими скоростями оседания лавы. Максимальные скорости субвертикальных смещений в этой области достигают значений 285 мм/год для 2017 года, 249 мм/год для 2018 года и 261 мм/год для 2019 года, в то время как скорость оседания поверхности в центральных и нижних частях лавовых потоков не превышает 80 мм/год.

С помощью математического моделирования [5, 13] получено, что для областей с мощностью потока менее 30 м скорости оседания лавы, измеренные по спутнику, могут быть хорошо объяснены моделью термического оседания. Однако, простая модель, учитывающая только температурное

сжатие вещества, не объясняет появление области с аномально высокими скоростями погружения поверхности и, также, оседание областей с большей мощностью лавы. Для детализации модели введены параметры процентного соотношения стёкол и пор в составе лавы Толбачика, температурные зависимости плотности и содержания кристаллов, учтена скрытая теплота кристаллизации, а также введён параметр скорости накопления слоёв лавы по толщине [13].

Результаты моделирования показали, что на скорость оседания поверхности потока существенно влияет скорость формирования лавовых потоков, пористость и содержание стёкол в расплаве. Наилучшее соответствие данным РСА интерферометрии было достигнуто для сценария «медленного» формирования слоя лавы, с пористостью 10–30% и содержанием стекла 30–50%. Области аномально быстрого оседания располагаются там, где во время извержения движение расплава происходило по лавовым трубам, уровень магмы в которых быстро понижался. Здесь скорости оседания лучше объясняются сценарием быстрого формирования лавового потока.

Аналогичное исследование выполнено для пирокластического потока вулкана Шивелуч. Результаты расчёта полей смещений склонов вулкана по сериям снимков Sentinel-1A за 2020, 2021 и 2022 гг. выявили область с большими оседаниями, совпадающую с контурами пирокластического потока, образовавшегося в процессе извержения 29.08.2019 г. (рис. 1А). Смещения происходят преимущественно по вертикали. Это подтверждается расчётами, выполненными по снимкам с разных орбит. Величины смещений на поверхности потока по расчётам с восходящей (140A) и нисходящей (60D) орбиты близки между собой, что свидетельствует о минимальном влиянии горизонтальных смещений по сравнению с вертикальными оседаниями. Максимальные скорости вертикальных оседаний составили 385 мм/год в 2020 г., 257 мм/год в 2021 г. и 150 мм/год в 2022 г.

Толщина отложений пирокластического потока на 2020, 2021 и 2022 год оценивалась по разности цифровых моделей рельефа (ЦМР) на эти годы и рельефа 2018 года. Корреляционные зависимости скорости оседания от толщины отложений показывают существенный разброс в данных (рис. 1Б). Для объяснения вклада различных процессов в механизм оседания потока была построена термомеханическая модель, учитывающая помимо термического остывания также уплотнение вещества за счёт изменения пористости по экспоненциальному закону [1]:

$$k(t) = \bar{k} - \Delta k \cdot (1 - e^{-t/a}) \quad (1)$$

где  $\bar{k}$  – средняя начальная пористость по разрезу,  $\Delta k$  – суммарное изменение пористости,  $a$  – масштабный коэффициент времени  $t$ .

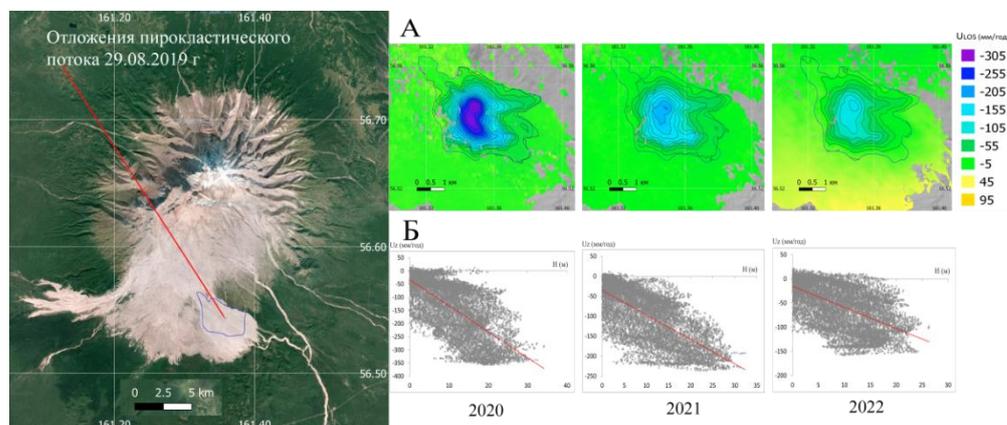


Рис. 1. На карте слева синим контуром показана область пирокластических отложений 2019 г. Справа: А) средние скорости смещений по РСА-интерферометрии в проекции распространения радарного сигнала (мм/год) за 2020, 2021 и 2022 г.; Б) зависимости вертикальных скоростей смещений поверхности отложений от толщины слоя отложений на 2020, 2021 и 2022 г.; красным цветом обозначена линия тренда.

Моделирование показало, что температурное остывание вносит небольшой вклад в оседание потока (от 27 до 62% с уменьшением мощности слоя от 30 до 10 метров соответственно), рис. 2А. При добавлении в модель компакция вещества за счёт изменения пористости, получено хорошее согласование оседаний потока с оценками оседания по РСА-интерферометрии для средних оценок по линии тренда (рис. 2Б). Но, как видно из рис. 1Б, относительно линии тренда наблюдается существенный разброс. Большая дисперсия свидетельствует о влиянии не учтенных в модели процессов, среди которых основным, по-видимому, является размыв отложений водными потоками.

Свободные параметры ( $a$  – масштаб времени,  $\Delta k$  – суммарное изменение пористости) для функции пористости подбирались по критерию минимума среднеквадратической невязки. Получено, что величина изменения пористости возрастает с увеличением мощности отложений. Наилучшее согласование модели оседания поверхности потока со спутниковыми данными достигается при  $\Delta k = 0.014$ , что соответствует уменьшению пористости с 2019 по 2022 г. для толщин отложений 10 м на 0.97%, для 15 и 20 м – на 1.36%, для 25 и 30 м – на 1.56%, т.е. компакция растет с увеличением мощности потока.

На рисунке 2В показано распределение температуры по глубине при различной мощности пирокластических отложений спустя 3 года после извержения при начальной температуре  $800^{\circ}\text{C}$ . Опираясь на данные измерений температуры аналогичного потока 2005 года [3], модель позволяет предположить, что начальная температура пород, сформировавших пирокластические отложения, превышала  $600^{\circ}$  градусов. В нашей модели при начальной температуре  $T_0=600^{\circ}\text{C}$  и мощности потока 30 метров, температура на глубине 1 метр через 6 лет, как и в работе [3], составляет  $\sim 40^{\circ}\text{C}$  (рис. 2Г).

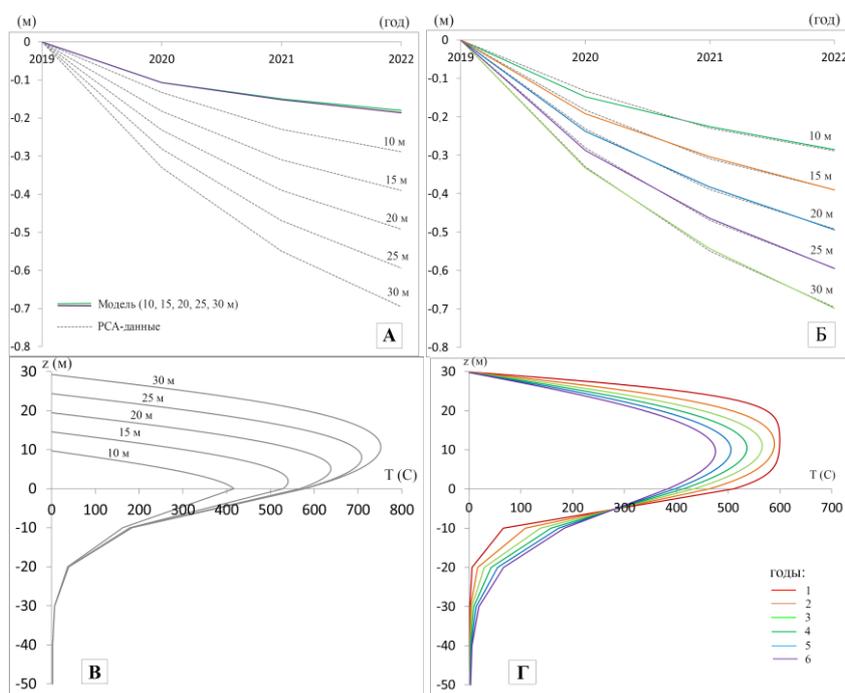


Рис. 2. Накопленные оседания пирокластических отложений, полученные по спутниковым данным (серая линия) и рассчитанные с помощью термомеханической модели (цветные линии) за 2020, 2021, 2022 гг. для мощности потока от 10 до 30 метров: (А) – результаты моделирования термического оседания при разной мощности потока, (Б) – результаты совместного моделирования процесса остывания и компакции среды; (В) - распределение температуры по глубине через 3 года после извержения для различных толщин отложений (начальная температура  $T_0=800^{\circ}\text{C}$ ); (Г) Распределение температуры по глубине для 30 метрового слоя при начальной температуре  $T_0 = 600^{\circ}\text{C}$ , по годам с прогнозом на 6 лет.

Очевидно, что для интерпретации спутниковых данных необходимо привлекать наземную информацию, которая позволяет правильно сформулировать обратные задачи и определить области возможных решений. Спутниковые данные также важны при наличии альтернативных гипотез, основанных на наземных данных. Таким примером является последняя активизация вулкана Коряжский в 2008–2009, сопровождавшаяся высокой сейсмичностью и фумарольной деятельностью. Поскольку вулкан расположен в самой густонаселённой части полуострова, то возник вопрос: сопровождалась ли активность вулкана подъёмом магмы к его поверхности? Часть исследователей считала, что это извержение чисто фреатическое, связано с растрескиванием прогретых пород фундамента вулкана и проникновением грунтовых вод в зону высоких температур. Другие исследователи связали события с подъемом магмы [2, 4]. По снимкам спутника ALOS на склоне вулкана в районе фумарол нами выявлена обширная область поднятий, высотой до 25 см, которые не могут быть объяснены формированием слоя пепловых отложений или склоновыми процессами. Численная модель внедрения дайки в постройку вулкана хорошо объясняет наблюдаемое поле смещений [6]. Результаты также согласуются с исследованиями авторов [4] о моделировании дайки

магморазрывом, и работы [2] об оценке энергии извержения. Все это подтверждает гипотезу о подъёме магмы к поверхности вулкана, что представляет более высокую степень опасности для населения. Другой пример – вулкан Большая Удина, где наблюдавшуюся сейсмическую активизацию в 2017 году авторы работ [7, 11] связали с возможным внедрением магмы под вулканическую постройку, из чего следовало заключение о высокой вероятности скорого извержения. Однако дальнейшие исследования миграции области афтершоковой активности во времени и полей смещений на склонах вулкана, полученных в процессе обработки радарных снимков спутников ALOS и Sentinel-1A, показали, что сейсмическая активизация вероятнее всего сопровождала процесс отступления и погружения магматического расплава от вулкана на глубину [8].

### Заключение

Радарная интерферометрия является эффективным методом, позволяющим оперативно получать высокоточные данные о деформациях земной поверхности в районах вулканической и сейсмической активности, строить цифровые модели рельефа, оценивать толщину пирокластических и лавовых отложений. Математические модели, построенные для интерпретации полученных полей смещений, дают возможность, подбирая параметры модели с использованием дополнительной наземной геолого-геофизической информации, оценить физические свойства пород и параметры наблюдаемых геодинамических процессов.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-17-00064, <https://rscf.ru/project/23-17-00064/>

### Список литературы

1. Волкова М.С., Михайлов В.О. Модель оседания поверхности пирокластического потока: вулкан Шивелуч, извержение 29.08.2019 г. // Геофизические исследования. 2022. №2. С. 73–84. doi.org/10.21455/gr2022.2-5.
2. Гордеев Е.И., Дроздин В.А. Температура эксплозивного шлейфа извержения вулкана Корякский в 2009 г. // Доклады Академии наук. 2010. Т. 430 (3). С. 349–351.
3. Гришин С.Ю., Комачкова И.В. Температура отложений мощного пирокластического потока 2005 г. на вулкане Шивелуч (Камчатка) и начало его зарастания // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2011. № 2. Выпуск № 18. С. 128–134.
4. Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А., Черных Е.В. Магматические питающие системы Корякско-Авачинской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и режима прилегающих термальных источников // Вулканология и сейсмология. 2017. №5. С. 3–17.
5. Михайлов В.О., Волкова М.С., Тимошкина Е.П., Шапиро Н.М., Бабаянц И.П., Дмитриев П.Н., Хайретдинов С.А. Анализ смещений поверхности лавовых потоков Толбачинского трещинного извержения 2012–2013 г. методами спутниковой радарной интерферометрии // Геофизические исследования. 2020. Т. 21, № 4. С.21–34. doi.org/10.21455/gr2020.4-2.
6. Михайлов В.О., Волкова М.С., Тимошкина Е.П., Шапиро Н.М., Смирнов В.Б. О связи активизации вулкана Корякский в 2008–2009 гг. с глубинными магматическими процессами // Физика Земли. 2021. № 6. С. 3–9.
7. Салтыков В.А., Воропаев П.В., Кугаенко Ю.А., Чебров Д.В. Удинская сейсмическая активизация 2017–2018 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 1. В. № 37. С. 5–7.
8. Сеньюков С.Л., Михайлов В.О., Нуждина И.Н., Киселева Е.А., Дроздина С.Я., Тимофеева В.А., Волкова М.С., Шапиро Н.М., Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Соболевская О.В. Совместное исследование сейсмичности и данных спутника Sentinel-1A для оценки возможного извержения потухшего вулкана Большая Удина // Вулканология и сейсмология. 2020. № 5. С. 26–39.
9. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002. V. 40(11). P. 2375–2383.
10. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 2001. V. 39 (1). P. 8–20.
11. Koulakov I., Komzeleva V., Abkadyrov I., Kugaenko Y., El Khrepy S., Al Arifi N. Unrest of the Uдина volcano in Kamchatka inferred from the analysis of seismicity and seismic tomography // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2019. 379. P. 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.05.006>
12. Lanari R., Mora O., Manunta M., Mallorqui J.J., Berardino P., Sansosti E. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms // In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004. V. 42. No. 7. P. 1377–1386. doi: 10.1109/TGRS.2004.828196.
13. Volkova M.S., Shapiro N.M., Melnik O.E., Mikhailov V.O., Plechov P.Yu., Timoshkina E.P., Bergal-Kuvikas O.V. Subsidence of the lava flows emitted during the 2012–2013 eruption of Tolbachik (Kamchatka, Russia): Satellite data and thermal model // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2022. V. 427. 107554, ISSN P. 0377-0273. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107554>.