

## Интерпретация полей смещений на склонах вулкана Шивелуч (Камчатка), полученных по спутниковым радарным снимкам с двух орбит

М. С. Волкова, В. О. Михайлов, Р. С. Османов

*Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, 123242, Россия  
E-mail: msvolkova6177@gmail.com*

По снимкам спутника Sentinel-1A за период с мая по октябрь 2022 г., выполненным с восходящей 140A и нисходящей 60D орбиты, получены новые данные о смещениях на склонах влк. Шивелуч в 2022 г. Выявлены три основные области деформаций, расположенные на восточном и западном склоне и в районе отложений пирокластического потока, сформировавшегося во время извержения 29.08.2019. По снимкам с двух орбит были рассчитаны смещения по вертикали. Показано, что в смещениях поверхности пирокластического потока горизонтальная компонента мала, а амплитуда вертикальных оседаний достигает 150 мм. Выполнены оценки мощности потока в 2021 и 2022 гг. Совместно с полученными ранее оценками на 2020 г. рассчитаны зависимости скорости оседания поверхности потока от мощности отложений. Для интерпретации этих смещений использована термомеханическая модель с подбором параметров изменения пористости пород потока во времени. Показано, что оценки оседания поверхности с высокой точностью совпадают с данными интерферометрии для средних значений скорости смещений, соответствующих линейному тренду, построенному по корреляционным зависимостям «скорость смещений поверхности — мощность слоя отложений». При этом чем больше мощность отложений, тем больше уменьшается пористость. С 2019 по 2022 г. пористость отложений мощностью в 10 м уменьшилась на 0,97 %, для 15 и 20 м — на 1,36 %, для 25 и 30 м — на 1,56 %. Наличие значительного разброса реальных данных в найденных зависимостях свидетельствует о большом вкладе экзогенных процессов. Также модель позволяет предположить, что температура пород в момент извержения превышала 600 °С. Разработанные методы определения и интерпретации полей смещений могут быть использованы для исследования термомеханических параметров отложений пирокластических потоков в других труднодоступных районах.

**Ключевые слова:** вулкан Шивелуч, смещения на склонах, пирокластический поток, спутниковая радарная интерферометрия, Sentinel-1A, термомеханическая модель, компакция вулканических пород

Одобрена к печати: 14.08.2023  
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-109-119

### Введение

Вулкан Шивелуч — самый северный активный вулкан п-ова Камчатка, расположен в 440 км от г. Петропавловск-Камчатский. Преимущественно андезитовый и андезибазальтовый состав магмы (вследствие высокой вязкости) обуславливает высокую степень explosивности извержений, представляющих опасность для жителей близлежащих населённых пунктов и авиации. Извержения зачастую сопровождаются мощными выбросами пепла, сходом пирокластических потоков (далее для краткости — поток), которые представляют собой раскалённую газопепловую смесь с вулканогенным материалом. Потоки могут перемещаться со скоростью до нескольких сотен километров в час и покрывать большие площади.

Спутниковая съёмка радарными с синтезированной апертурой (РСА) позволяет проводить регулярный мониторинг вулканов, в том числе и во время их активных фаз, независимо от погодных условий и освещённости. Данная технология позволяет оценивать развитие смещений земной поверхности во времени на больших территориях. Так, размеры снимка спутника Sentinel-1A покрывают площадь до 200×250 км.

Оценка полей смещений земной поверхности и объектов инфраструктуры основана на совместной обработке двух или нескольких снимков. Для этого необходимо, чтобы снимки

обладали некоторым сходством, т. е. были когерентны. Когерентность — это мера взаимной корреляции, которая меняется в пределах от 0 до 1 (Ferretti, 2014). Две основные причины, по которым обработка пары снимков может оказаться невозможной, — это низкая когерентность и неоднородное возмущённое состояние атмосферы. Потеря когерентности может быть связана с появлением снежного покрова или густой растительности, со сходом лавин и селевых потоков. Некогерентными являются области с низкой отражательной способностью — болота, поверхности водоёмов. Неблагоприятные атмосферные процессы — турбулентность, стратификация, осадки — искажают радарный сигнал, снижая достоверность результатов. В некоторой степени устранить влияние этих процессов могут методы, основанные на обработке серий последовательных во времени снимков. В частности, метод малых базовых линий (*англ.* Small Baseline Subset — SBaS), который включает фильтрацию длиннопериодных сигналов по пространству и короткопериодных сигналов во времени, эффективно строит модель атмосферы с последующим удалением связанных с ней эффектов (Berardino et al., 2002; Lanari et al., 2004).

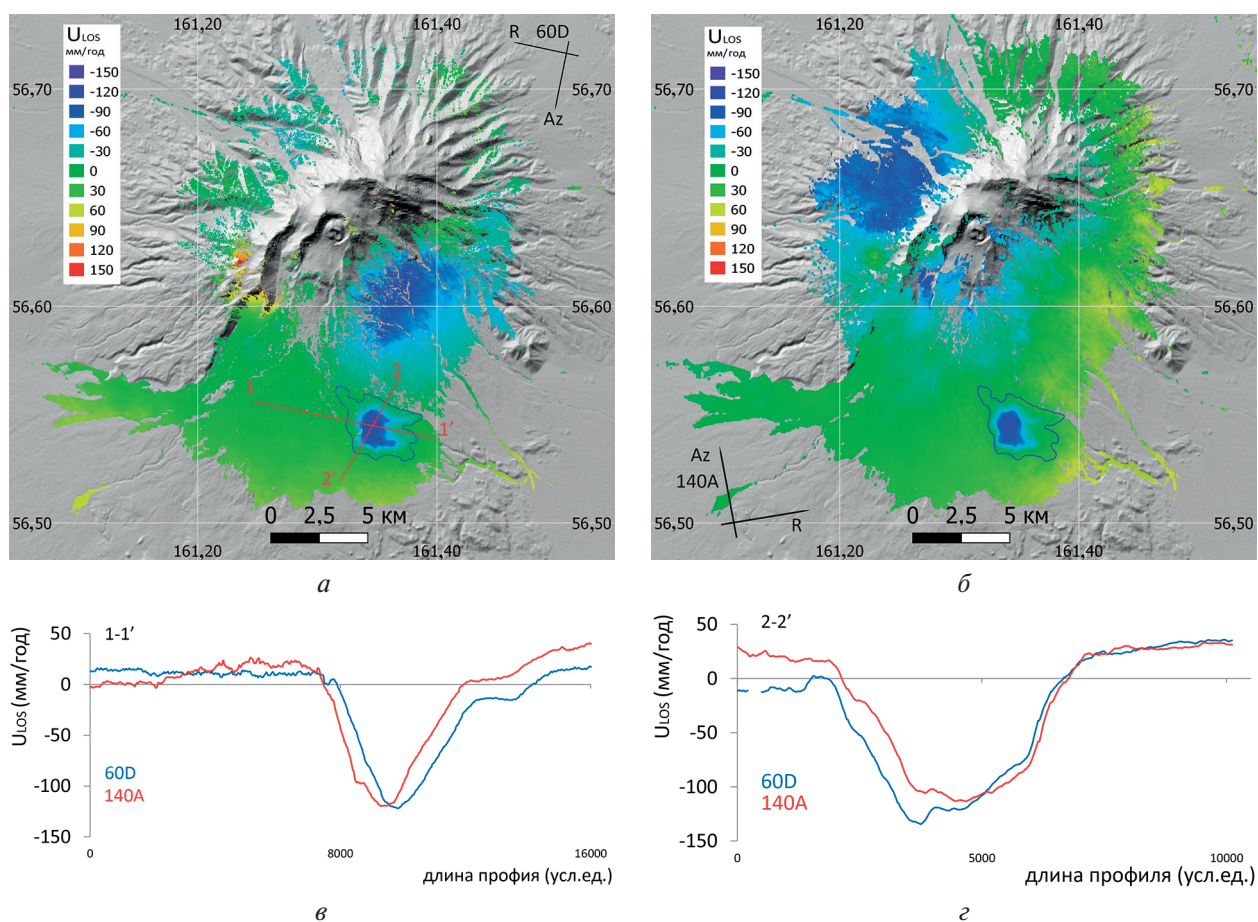
Нами с использованием радарных снимков спутника Sentinel-1A с двух орбит, восходящей и нисходящей, получены новые оценки полей смещений поверхности влк. Шивелуч за 2022 г. Выявлены три основные области смещений: восточный и западный склон вулканической постройки и область пирокластического потока, сформировавшего значительные толщи отложений во время извержения 29.08.2019. Ранее (Волкова, Михайлов, 2022) нами были получены поля смещений за 2020 и 2021 гг., построены цифровые модели рельефов на 2018 и 2020 гг. и по разности этих рельефов оценена мощность пирокластических отложений. Полученные данные были использованы для построения термомеханической модели, которая позволила оценить влияние различных процессов на оседание кровли потока с 2019 по 2021 г.

Для интерпретации новых данных об оседаниях поверхности потока, полученных по радиолокационным снимкам с двух орбит, было продолжено математическое моделирование термического оседания и уплотнения пород потока с определением различных характеристик и физических свойств путём сопоставления результатов моделирования со спутниковыми оценками смещений. Также по наборам снимков Sentinel-1A за периоды с мая по октябрь 2021 и 2022 гг. были построены модели рельефов на 2021 и 2022 гг., что позволило получить новые данные об изменении мощности отложений с 2020 по 2022 г.

### Оценки полей смещений по данным РСА-интерферометрии

Методом малых базовых линий (SBAS), реализованном в программном пакете ENVI SARscape, нами были рассчитаны поля средних скоростей смещений на склонах влк. Шивелуч за 2022 г. как с нисходящей (*англ.* descending) орбиты 60D, так и с восходящей (*англ.* ascending) орбиты 140A. В период с мая по октябрь 2022 г. с орбиты 60D спутником Sentinel-1A всего было выполнено 11 снимков (с 24 мая по 3 октября), а с орбиты 140A — 13 снимков (с 18 мая по 9 октября). Относительная точность оценки средних скоростей смещений, определяемая из соотношения дисперсии и когерентности, составила 5 мм/год (Ferretti, 2014). По картам скоростей смещений, полученным с обеих орбит, выделяются три основные области деформаций: восточный склон, западный склон и район отложений пирокластического потока 2019 г. (обведён синим контуром на *рис. 1*, см. с. 111). Склоны, обращённые к радиолокатору, отражают больший сигнал, чем склоны, обращённые от радиолокатора. Поэтому с нисходящей орбиты (см. *рис. 1а*) лучше виден восточный склон, на котором отмечены максимальные скорости смещений от спутника в направлении распространения электромагнитного сигнала (*англ.* line of sight — LOS), а именно –125 мм/год. На западном склоне, который преимущественно находится в зоне тени, радарная интерферометрия смещений не показала. Для восходящей орбиты (см. *рис. 1б*), напротив, лучше виден западный склон. Максимальные скорости смещения от спутника здесь достигают –120 мм/год, и также на противоположном восточном склоне смещения зафиксировать не удалось. На *рис. 1в* и *г*

показаны значения скорости смещений вдоль двух профилей, проведённых через поток и обозначенных красными линиями на *рис. 1а*. Скорости смещений, полученные с восходящей орбиты, показаны красным цветом, с нисходящей орбиты — синим. Видно, что величины смещений на поверхности потока по расчётам с двух орбит близки между собой. Это свидетельствует о том, что смещения на север и восток малы по сравнению с вертикальной компонентой, поскольку для восходящей и нисходящей орбиты смещения на север и восток входят в уравнение (1) с различными коэффициентами, а восточная компонента ещё и с противоположным знаком.



*Рис. 1.* Карты скоростей смещений по снимкам с нисходящей орбиты 60D (*а*) и с восходящей орбиты 140А (*б*); чёрными линиями показаны направление азимута орбиты (Az) и направление съёмки (R). Профили (*в*), (*з*) — значения средних скоростей смещений вдоль линий 1–1' и 2–2', отмеченных на *рис. 1а* красным цветом; красные графики — значения скоростей смещений, полученные с восходящей орбиты 140А, синие графики — полученные с нисходящей орбиты 60D

В методе РСА-интерферометрии смещения определяются по разности фаз радарных сигналов, отражённых от одних и тех же объектов при первой и второй съёмке. Эти смещения можно выразить через смещения по вертикали  $U_z$ , на север  $U_N$  и восток  $U_E$ :

$$U_{LOS} = U_z \cos(\theta) + \sin(\theta) \cdot (U_N \sin(\beta) - U_E \cos(\beta)), \quad (1)$$

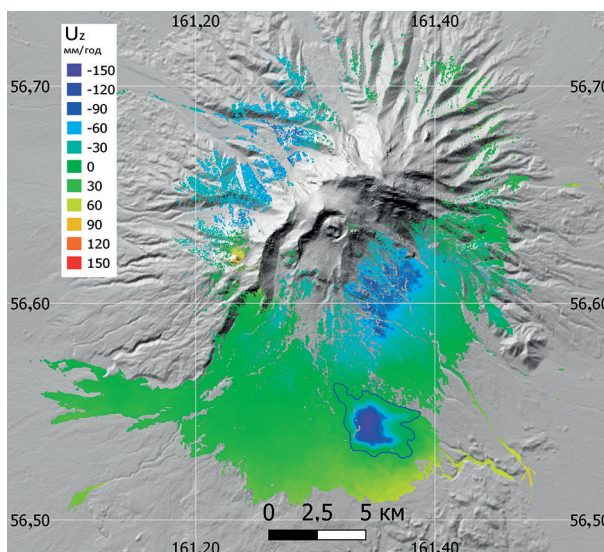
где  $\theta$  — угол отклонения от вертикали направления распространения радарного сигнала;  $\beta$  — азимут орбиты спутника. Поскольку околополярная орбита спутника имеет малое отклонение от направления север–юг ( $<10^\circ$ ), то РСА-данные менее чувствительны к северной компоненте смещений (нулевая чувствительность к смещениям вдоль орбиты), и этой компонентой часто пренебрегают. Положительными считаются смещения на восток и к спутнику, а отрицательными — смещения на запад и от спутника.

При съёмке с двух орбит возникает два уравнения вида (1) с углами  $\theta_{asc}$ ,  $\theta_{desc}$ ,  $\beta_{asc}$ ,  $\beta_{desc}$ . Угол  $\theta_{asc}$  соответствует съёмке с восходящей орбиты и для исследуемой области меняется от 39,85 до 42,42°, второй угол  $\theta_{desc}$  при съёмке с нисходящей орбиты находится в пределах от 30,64 до 33,2°. Для азимутов орбит можно положить  $\beta_{asc} + \beta_{desc} = 180^\circ$ . Тогда из уравнения (1) получаем:

$$\begin{cases} U_E = \frac{U_{LOS_{desc}} \cos(\theta_{asc}) - U_{LOS_{asc}} \cos(\theta_{desc})}{\sin(\theta_{asc} + \theta_{desc}) \cdot \cos(\beta_{asc})}, \\ U_z = \frac{U_{LOS_{asc}} \sin(\theta_{desc}) + U_{LOS_{desc}} \sin(\theta_{asc})}{\sin(\theta_{asc} + \theta_{desc})}. \end{cases} \quad (2)$$

В данном случае корректное определение горизонтальной компоненты на высоком горном рельефе по формуле (2) не является надёжным, поскольку отсутствует область пересечения достоверных результатов с двух орбит. Каждая орбита (восходящая и нисходящая) даёт надёжные смещения на одном склоне, а на противоположном склоне для каждой орбиты смещения получены на уровне шума.

Рис. 2. Смещения по вертикали  $U_z$ , полученные по радарным снимкам с двух орбит (60D и 140A) по формуле (2)



На рис. 2 показаны чисто вертикальные скорости смещений, здесь значения на западном и восточном склонах отрицательные. Сопоставление карты вертикальных смещений (см. рис. 2) с картами смещений в направлении на спутник с восходящей и нисходящей орбиты (см. рис. 1) позволяет заключить, что эти смещения, вероятнее всего, связаны с эрозионными процессами. Также на рис. 2 видно, что в области потока максимальные скорости вертикальных смещений составляют 150 мм/год. Для интерпретации высоких скоростей смещений поверхности потока рассмотрим этот участок более детально.

### Скорость смещений при различной толщине пирокластических отложений

Толщина отложений пирокластического потока на 2020, 2021 и 2022 гг. оценивалась по разности цифровых моделей рельефов (ЦМР) на эти годы и рельефа 2018 г. Все ЦМР были построены методом SBAS по снимкам спутника Sentinel-1A. Изменения, произошедшие в 2019 г., включая извержение 29 августа, не позволили рассчитать ЦМР на этот год из-за низкой когерентности снимков. На рис. 3 (см. с. 113) показано сопоставление карт мощности потока со скоростью его усадки в проекции на спутник (LOS) с 2020 по 2022 г. соответственно.

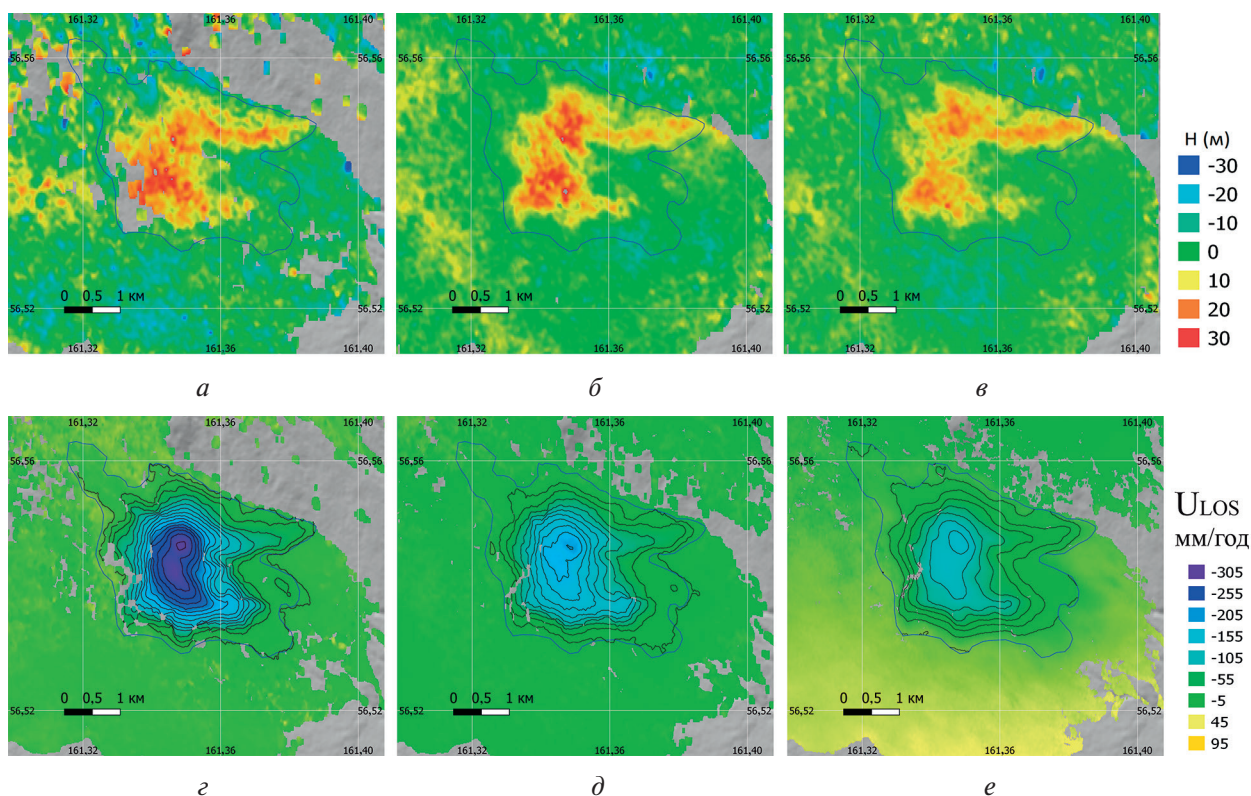


Рис. 3. Карты мощности отложений потока (м), полученные по разности ЦМР, построенных на 2020 г. (а), 2021 г. (б) и 2022 г. (в), относительно рельефа 2018 г.; синий контур — нулевая изолиния поля скорости смещений, построенного на 2020 г.; г, д, е — скорость оседания поверхности потока (мм/год) (LOS) в 2020, 2021 и 2022 гг. соответственно

На рис. 4 представлены зависимости скорости оседаний поверхности потока от мощности отложений на 2020, 2021 и 2022 гг. Для построения этих зависимостей значения смещений LOS были пересчитаны в вертикальные смещения. Несмотря на большой разброс данных и постепенное ослабление корреляции (−0,69, −0,68 и −0,57 за 2020–2022 гг.), по-прежнему фиксируется связь скорости оседания поверхности потока и его мощности.

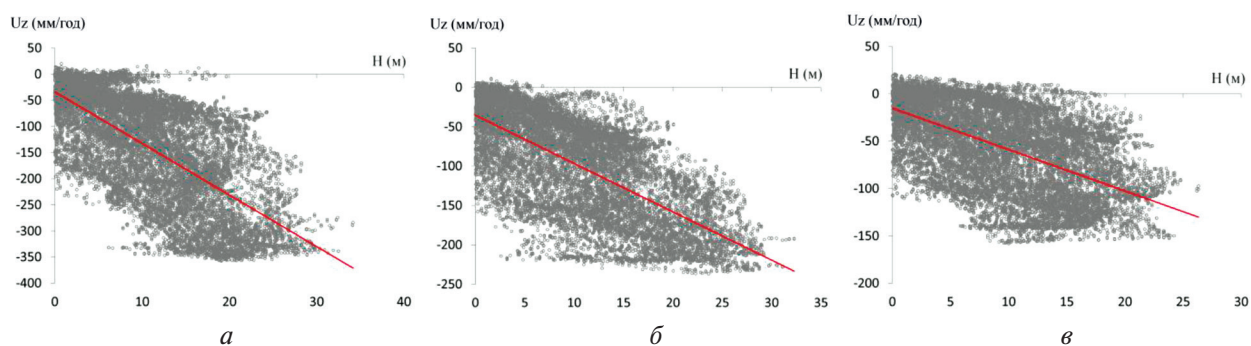


Рис. 4. Корреляционные зависимости значений средней скорости оседания поверхности потока (вертикальная ось, мм/год) от мощности отложений (горизонтальная ось, м); данные за 2020 г. (а), 2021 г. (б), 2022 г. (в)

Рассмотрим величины накопленных оседаний на 2020–2022 гг. в зависимости от мощности отложений потока (табл. 1). Для каждой толщины слоя выберем среднее значение оседания его поверхности, соответствующее линейному тренду «скорость–мощность» с 2020 по 2022 г. (см. рис. 4). Следует заметить, что при построении ЦМР точность оценки высоты

снижается с уменьшением базовой линии спутника, т. е. расстояния между точками, из которых произведён первый и второй снимок. Поскольку базовая линия спутника Sentinel-1A небольшая (в среднем около 100 м), мы не рассматривали области с мощностью отложений меньше 10 м.

Таблица 1. Накопленные оседания поверхности (в метрах) по РСА-данным в зависимости от мощности потока

Годы	10 м	15 м	20 м	25 м	30 м
2020	-0,133	-0,182	-0,231	-0,280	-0,330
2021	-0,229	-0,3093	-0,389	-0,469	-0,493
2022	-0,288	-0,3901	-0,492	-0,594	-0,696

Новые данные о смещениях по РСА-интерферометрии были использованы в термомеханической модели для интерпретации деформаций в районе отложений пирокластического потока.

### Модель оседания поверхности пирокластического потока

Ниже дано краткое описание термомеханической модели. Подробное описание приведено в работе (Волкова, Михайлов, 2022). Эта модель предполагает оседание материала пирокластического потока на влк. Шивелуч не только за счёт термического охлаждения, но и за счёт компакци вещества. Рассматривается одномерная задача вдоль вертикальной оси  $Oz$ . Поскольку поток достаточно однородный по горизонтали и его горизонтальные размеры существенно больше его толщины, то горизонтальными компонентами при моделировании можно пренебречь. Вдоль оси  $Oz$  модель разделена на  $N$  элементов с шагом дискретизации  $\Delta z_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, N$ , который меняется с изменением температуры. Расчёты показали, что оседание при охлаждении потока объясняет лишь часть вертикальных смещений, более существенное влияние оказывает изменение пористости во времени.

Пусть  $\bar{k}$  — средняя начальная пористость по разрезу. Тогда положим, что в момент времени  $t$  пористость  $k(t)$  уменьшается по следующему закону:

$$k(t) = \bar{k} - \Delta k(1 - e^{-t/a}), \tag{3}$$

где  $\Delta k$  — суммарное изменение пористости;  $a$  — масштабный коэффициент времени. Пусть по материалам исследований пирокластических пород более древних потоков влк. Шивелуч, в предположении, что состав лав этого вулкана был в достаточной степени постоянным (Горбач, Портнягин, 2011), нам известна асимптотически достижимая пористость как некоторая величина  $k_0$ . Тогда средняя начальная пористость составляет  $\bar{k} = k_0 + \Delta k$ . Доля скелетной фракции пород в начальный момент времени ( $t = 0$ ) и в момент времени  $t > 0$  равна  $(1 - \bar{k})$  и  $(1 - k(t))$  соответственно. Тогда уменьшение высоты ячейки сетки за счёт уплотнения среды определяется из закона сохранения массы скелета:

$$\Delta z_i(t) = \frac{\Delta z_{0,i}(1 - \bar{k})\rho_0}{(1 - k(t))\rho(t)}, \tag{4}$$

где  $\Delta z_{0,i}$  и  $\rho_0$  — размер ячейки сетки и плотность породы в начальный момент времени;  $\rho(t)$  — плотность скелета в момент времени  $t$ , зависящая от температуры:

$$\rho(t) = \rho(t, T) = \rho_0 \{1 - \alpha(T(t) - T_0)\}. \tag{5}$$

Подставив выражение (5) в уравнение (4) и обозначая температурную деформацию при нагреве/охлаждении как

$$\delta z(t) = \Delta z_{0,i} (1 + \alpha(T - T_0)),$$

получим:

$$\Delta z_i(t) = \delta z(t) \frac{1 - \bar{k}}{1 - k(t)}.$$

Здесь  $\alpha$  — коэффициент температурного расширения, а температура  $T$  определяется в слое потока из решения уравнения теплопроводности со следующими начальными и граничными условиями (Волкова, Михайлов, 2022):

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{term} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + W(z, t) \frac{\partial T}{\partial z}; \\ T(z, t = 0) = \begin{cases} T_{pyr} & \text{при } z = [-H; 0], \\ dT_0 \cdot z & \text{при } z = (0; H_{max}]; \end{cases} \\ T(z, t > 0) = \begin{cases} 0 & \text{при } z = -H, \\ dT_0 \cdot z & \text{при } z = H_{max}, \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

где  $T(z, t)$  и  $W(z, t)$  — температура и скорость оседания материала на глубине  $z$  в момент времени  $t$ ;  $H(t)$  — мощность пирокластических отложений;  $H_{max}$  — глубина нижней границы модели (задаётся достаточно большой, чтобы считать, что изменением температуры за три года ниже этой границы можно пренебречь);  $T_{pyr}$  — начальная температура материала;  $dT_0$  — градиент температуры в грунте к моменту начала извержения, принятый равным  $25 \text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$ ;  $k_{term} = \lambda / (\rho \cdot c_p)$  — температуропроводность;  $\lambda$  — теплопроводность;  $\rho(t)$  — плотность;  $c_p$  — удельная теплоёмкость. Параметры модели приведены в *табл. 2*. При аппроксимации реальных данных результатами расчётов свободными параметрами были величины, определяющие закон изменения пористости (3): суммарное изменение пористости  $\Delta k$  и масштабный коэффициент времени  $a$ .

Таблица 2. Параметры модели

Физическая величина	Значение
$\rho_0$	2,4 г/см <sup>3</sup>
$T_{pyr}$	800 °C
$\lambda$	1,1 Вт/МК
$c_p$	1,2 · 10 <sup>3</sup> Дж · кг <sup>-1</sup> · К <sup>-1</sup> (лава) 0,820 · 10 <sup>3</sup> Дж · кг <sup>-1</sup> · К <sup>-1</sup> (грунт)
$\alpha$	3,4 · 10 <sup>-5</sup>
$k_0$	0,5
$\Delta z_0$	0,1 м
$\tau$	0,5 сут

## Результаты моделирования

Для оценки вклада термической компоненты в оседание поверхности был проведён расчёт распределения температуры с глубиной как функции времени по уравнениям (6). Термическое оседание за 3 года (с 2019 по 2022 г.) составляет от 27 до 62 % от общего измененного оседания в зависимости от мощности отложений (*рис. 5а*, см. с. 116). Из рисунка следует, что чем больше мощность потока, тем меньший вклад вносит процесс остывания в оседание его поверхности, поскольку слои большей мощности дольше остывают и оседание происходит медленнее.

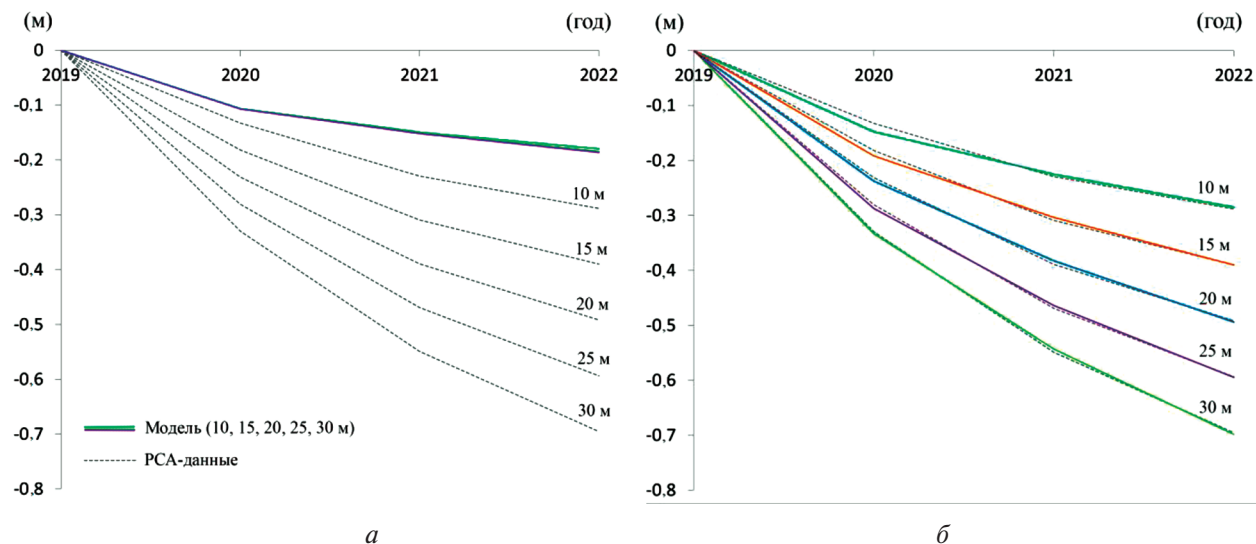


Рис. 5. Накопленные оседания пирокластических отложений, полученные по спутниковым данным (серая линия) и рассчитанные с помощью термомеханической модели (цветные линии) за 2020, 2021, 2022 гг. для мощности потока от 10 до 30 м: *а* — результаты моделирования термического оседания; *б* — результаты совместного моделирования процесса остывания и компактиции среды

При добавлении в модель процесса уплотнения вещества за счёт изменения пористости получено хорошее совпадение решения с фактическими спутниковыми данными (рис. 5б). Подбор параметров функции изменения пористости во времени (свободные параметры  $a$  и  $\Delta k$ ) осуществлён по критерию минимума среднеквадратической невязки. Наилучшим образом решение об оседании поверхности потока соответствует спутниковым данным при суммарном изменении пористости  $\Delta k = 0,014$ . Масштабный временной коэффициент при этом зависит от мощности слоя — чем толще слой, тем быстрее уплотняется вещество. При изменении толщины от 10 до 30 м характерное время  $a$  снижается со значений, превышающих 6 лет, до величины немногим более трёх лет соответственно.

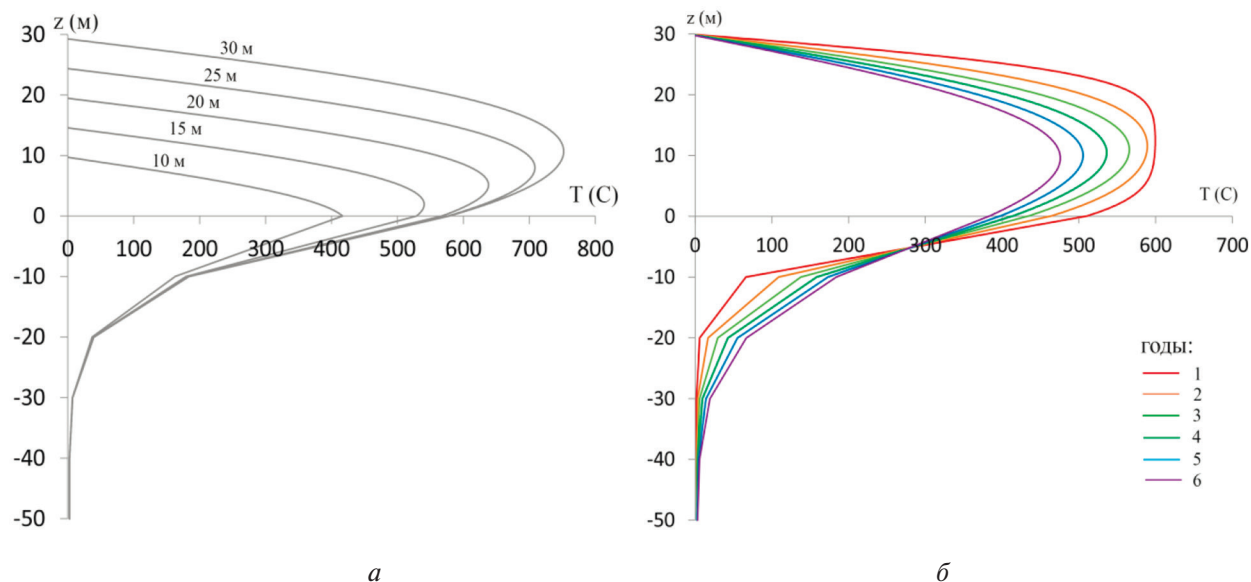


Рис. 6. Распределение температуры через три года после извержения по глубине для различных толщин отложений ( $T_0 = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (*а*). Распределение температуры по глубине для 30-метрового слоя при  $T_0 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$  по годам с прогнозом на 6 лет (*б*). Горизонтальная шкала — температура ( $^\circ\text{C}$ ), вертикальная шкала — глубина (м); ноль расположен на подошве потока



Хорошее согласование оседаний потока с оценками оседания по РСА-интерферометрии получено для средних оценок на линии тренда. Но как видно из *рис. 4*, относительно линии тренда наблюдается существенный разброс. Большая дисперсия свидетельствует о влиянии неучтённых в модели процессов, среди которых основным, по-видимому, является размыв отложений водными потоками.

При начальной температуре 800 °С и мощности отложений 30 м температура в недрах потока за три года снижается слабо — до 752 °С. За это же время температура слоя мощностью 10 м снижается до 400 °С. Такая температура достигается на подошве слоя, а на глубине 1 м от поверхности она равна 60 °С (*рис. 6а*, см. с. 116). Имеются данные измерений температуры в недрах аналогичного потока на влк. Шивелуч, сформированного в 2005 г. (Гришин, Комачкова, 2011). В области, где максимальная мощность потока, предположительно, превышает 30 м, температура на глубине 1 м спустя 6 лет после извержения составила 40 °С. В нашей модели при начальной температуре  $T_0 = 800$  °С и мощности потока 30 м температура на глубине 1 м через 6 лет составит примерно 50 °С, а при начальной температуре 600 °С — 40 °С. Это позволяет предположить, что начальная температура вулканических пород при извержении превышала 600 °С. На *рис. 6б* показано распределение температуры с глубиной при остывании потока мощностью 30 м по годам при начальной температуре 600 °С.

## Заключение

В работе представлены новые данные о смещениях на склонах влк. Шивелуч за 2022 г., полученные по спутниковым снимкам с двух орбит с различной геометрией съёмки. Выявлены три основные области смещений: на восточном и западном склоне, а также на поверхности пирокластического потока, сформированного в результате извержения 29.08.2019. Наиболее детально исследованы средние скорости вертикальных оседаний поверхности пирокластического потока, которые достигают 150 мм/год. Выполненные оценки мощности потока за 2020–2022 гг. позволили получить ряд зависимостей скорости оседания потока от его мощности. Термомеханическая модель, учитывающая изменения пористости во времени, показала, что оценки оседания поверхности с высокой точностью совпадают с данными интерферометрии для средних значений скорости смещений, соответствующих линейному тренду, построенному по корреляционным зависимостям «скорость — мощность». При этом величина изменения пористости возрастает с увеличением мощности отложений. С 2019 по 2022 г. пористость отложений мощностью в 10 м уменьшилась на 0,97 %, для 15 и 20 м — на 1,36 %, для 25 и 30 м — на 1,56 %. Наличие большой дисперсии данных относительно линейного тренда «скорость оседаний — мощность потока» (см. *рис. 4*) указывает на существенное влияние неучтённых в модели факторов, в первую очередь эрозионных процессов. Моделирование показало, что температурное остывание вносит небольшой вклад в оседание потока (от 27 до 62 % с уменьшением мощности слоя от 30 до 10 м соответственно). Также с опорой на данные измерений температуры аналогичного потока 2005 г. (Гришин, Комачкова, 2011) модель позволяет предположить, что начальная температура пород, сформировавших пирокластический поток, превышала 600 °С.

Авторы благодарят Европейское космическое агентство (*англ.* European Space Agency — ESA) за предоставленные радарные снимки спутников Sentinel-1A.

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

## Литература

1. Волкова М. С., Михайлов В. О. Модель оседания поверхности пирокластического потока: вулкан Шивелуч (Камчатка), извержение 29.08.2019 г. // Геофиз. исслед. 2022. Т. 23. № 2. С. 73–85. DOI: 10.21455/gr2022.2-5.

2. Горбач Н. В., Портнягин М. В. Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч // Петрология. 2011. Т. 19. № 2. С. 140–172.
3. Гришин С. Ю., Комачкова И. В. Температура отложений мощного пирокластического потока 2005 г. на вулкане Шивелуч (Камчатка) и начало его зарастания // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 2. Вып. 18. С. 128–134.
4. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2002. V. 40. No. 11. P. 2375–2383.
5. Ferretti A. Satellite InSAR Data: Reservoir Monitoring from Space. L., UK: EAGE Publications, 2014. 160 p.
6. Lanari R., Mora O., Manunta M. et al. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2004. V. 42. No. 7. P. 1377–1386. DOI: 10.1109/TGRS.2004.828196.

## Interpretation of displacement fields on the slopes of Shiveluch volcano (Kamchatka) obtained from SAR interferometry images from two orbits

M. S. Volkova, V. O. Mikhailov, R. S. Osmanov

*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow 123242, Russia  
E-mail: msvolkova6177@gmail.com*

We obtained new data on displacements on the slopes of the Shiveluch volcano in 2022 using SAR images of the Sentinel-1A satellite for the period from May to October 2022, taken from the ascending 140A and descending 60D orbits. We identified three main areas of displacements, located on the eastern and western slopes and in the area of the pyroclastic flow formed during the eruption on August 29, 2019. From the images taken from two orbits, the displacements along the vertical were calculated. In displacements of the flow surface, the horizontal component is small, and the vertical subsidence amplitude reaches 150 mm. The flow thickness was estimated for 2021 and 2022. Together with the previously obtained estimates for 2020, the dependences of the flow surface subsidence rate on the thickness of the deposits were calculated. To interpret these displacements, we harnessed a thermo-mechanical model selecting parameters of porosity change with time. It is shown that the estimates of surface subsidence coincide with high accuracy with the SAR interferometry data for average values of displacement rates corresponding to a linear trend constructed from the correlation dependences “surface displacement velocity — thickness of the sediment layer”. In this case, the greater the thickness of the deposits, the more the porosity decreases. From 2019 to 2022, the porosity of deposits with a thickness of 10 m decreased by 0.97 %, for 15 and 20 m — by 1.36 %, for 25 and 30 m — by 1.56 %. The presence of a significant variance of real data around the found dependences indicates a large contribution of erosion processes. The model also suggests that the temperature of the volcanic rocks at the time of the eruption exceeded 600 °C. The developed methods for determining and interpreting displacement fields can be used to study the thermomechanical parameters of pyroclastic flow deposits in other remote areas.

**Keywords:** Shiveluch volcano, slope displacements, pyroclastic flow, satellite SAR interferometry, Sentinel-1A, thermomechanical model, volcanic rock compaction

Accepted: 14.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-109-119

## References

1. Volkova M. S., Mikhailov V. O., Model of pyroclastic flow surface subsidence: Shiveluch volcano (Kamchatka), eruption on 29.08.2019, *Geophysical Research*, 2022, Vol. 23, No. 2, pp. 73–85 (in Russian), DOI: 10.21455/gr2022.2-5.
2. Gorbach N. V., Portnyagin M. V., Geology and petrology of the lava complex of Young Shiveluch volcano (Kamchatka), *Petrology*, 2011, Vol. 19, No. 2, pp. 134–166 (in Russian).
3. Grishin S. Yu., Komachkova I. V., The temperature of deposits of powerful pyroclastic flow from the 2005 Shiveluch volcano eruption, Kamchatka, and beginning of colonization of the substrate, *Bull. Kamchatka regional association "Educational-scientific center". Earth sciences*, 2011, No. 2, Issue 18, pp. 128–134 (in Russian).
4. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E., A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2002, Vol. 40, No. 11, pp. 2375–2383.
5. Ferretti A., *Satellite InSAR Data: Reservoir Monitoring from Space*, London, UK: EAGE Publications, 2014, 160 p.
6. Lanari R., Mora O., Manunta M. et al., A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2004, Vol. 42, No. 7, pp. 1377–1386, DOI: 10.1109/TGRS.2004.828196.