

УДК 550.31

## МОДЕЛЬ ОСЕДАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПИРОКЛАСТИЧЕСКОГО ПОТОКА: ВУЛКАН ШИВЕЛУЧ (КАМЧАТКА), ИЗВЕРЖЕНИЕ 29.08.2019 г.

© 2022 г. М.С. Волкова, В.О. Михайлов

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия  
Автор для переписки: М.С. Волкова (e-mail: msvolkova6177@gmail.com)*

Исследуются возможные причины оседаний поверхности пирокластического потока, образовавшегося на склонах вулкана Шивелуч (Камчатка) в процессе извержения 29.08.2019 г. По данным РСА-интерферометрии по сериям снимков спутника Европейского космического агентства Сентинель-1А за периоды 05–10.2020 г. и 05–10.2021 г. построены карты скорости смещений поверхности вулкана. Обнаружена область с большими оседаниями, совпадающая с областью пирокластического потока на юго-восточном склоне. Максимальные скорости оседаний составили 385 мм/год в 2020 г. и 257 мм/год в 2021 г. По радарным снимкам за 2020 г. проведена оценка мощности пирокластических отложений. Зависимость скорости оседаний от мощности потока при достаточно высоком коэффициенте корреляции (–0.69) имеет существенный разброс.

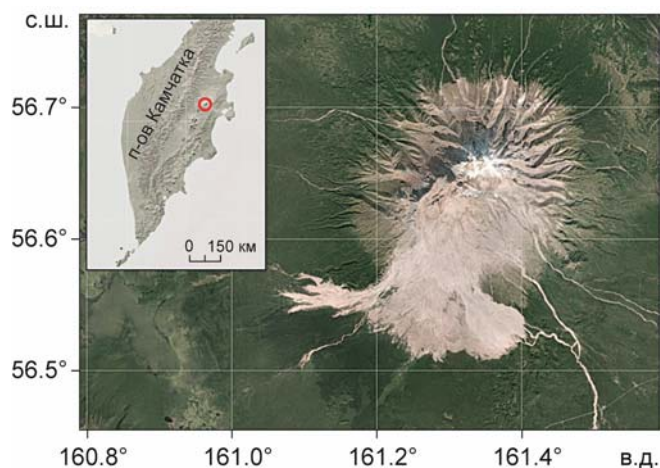
Построена термомеханическая модель, в которой учтена компакция отложений за счёт изменения во времени их пористости и плотности. Согласно модели для объяснения зависимости скорости оседаний поверхности потока от мощности пород, достаточно предположить, что в дополнение к оседанию при остывании потока происходит небольшое изменение пористости, которое в зависимости от начальной температуры потока составило от 1.5 до 1.7 % за период с 2019 по 2021 гг. Разброс зависимости “скорость оседаний – мощность потока” объясняется процессами размыва пирокластических отложений.

**Ключевые слова:** пирокластический поток, вулкан Шивелуч, РСА-интерферометрия, Сентинель-1А, термомеханическая модель, оседание поверхности потока.

### Введение

Самый северный вулкан полуострова Камчатка – вулкан Шивелуч – расположен в 45 км от п. Ключи (рис. 1). Это один из самых активных и крайне опасных вулканов полуострова. С начала века он извергается почти постоянно. Его извержения характеризуются как пароксизмальные эксплозивные, они могут быть катастрофическими, часто сопровождаются мощными пепловыми выбросами и, как правило, пирокластическими потоками [Мальшев, 2000; Озеров и др., 2020]. К особенностям вулкана относится повышенное содержание воды в составе магмы [Dirksen et al., 2006; Goltz et al., 2020]. Постройка вулкана сложена андезитами и андезибазальтами [Горбач, Портнягин, 2011]. С начала 2019 г. наблюдается нарастание активности вулкана, постоянно отмечаются выжимание пластичного лавового блока в жерле вулкана, сильная фумарольная активность, мощные пепловые выбросы, лавовые лавины.

В результате мощного извержения взрывного типа 29.08.2019 г. произошло обрушение купола и сход пирокластического потока [Гирина и др., 2020]. Смесь, состоящая из вулканического газа, пепла и камней, выброшенная в воздух в момент взрыва, осела на юго-восточном склоне вулкана. Путём анализа снимков спутника Сентинель-1А, выполненных радаром с синтезированной апертурой (РСА) в бесснежные периоды 2020 и 2021 гг., были оценены смещения на склонах вулкана Шивелуч и обнаружены



**Рис. 1.** Вулкан Шивелуч. Район исследования на карте *Google Map*. Красным кружком на врезке отмечено местоположение вулкана на п-ове Камчатка

**Fig. 1.** Shiveluch volcano. The study area on the *Google Map*. Red circle on the inset shows location of the volcano on the Kamchatka Peninsula

высокие скорости погружения дневной поверхности в области пирокластического потока в юго-восточной части вулкана. Оседание поверхности потока может быть связано с его остыванием и уплотнением, а также с эрозионными процессами. Для выявления возможных причин оседания нами была построена математическая модель, описывающая смещение поверхности отложившегося материала при термическом охлаждении, а также при его усадке за счёт компакции. Поскольку продукты извержения вулкана Шивелуч имеют достаточно постоянный состав [Горбач, Портнягин, 2011], в расчётах использовались значения физических свойств изверженной породы (начальная температура, пористость, плотность, теплоёмкость), известные по прошлым извержениям. Далее путём сопоставления расчётных и реальных данных параметры уточнялись с целью определения вклада различных процессов в наблюдаемые оседания поверхности пирокластического потока.

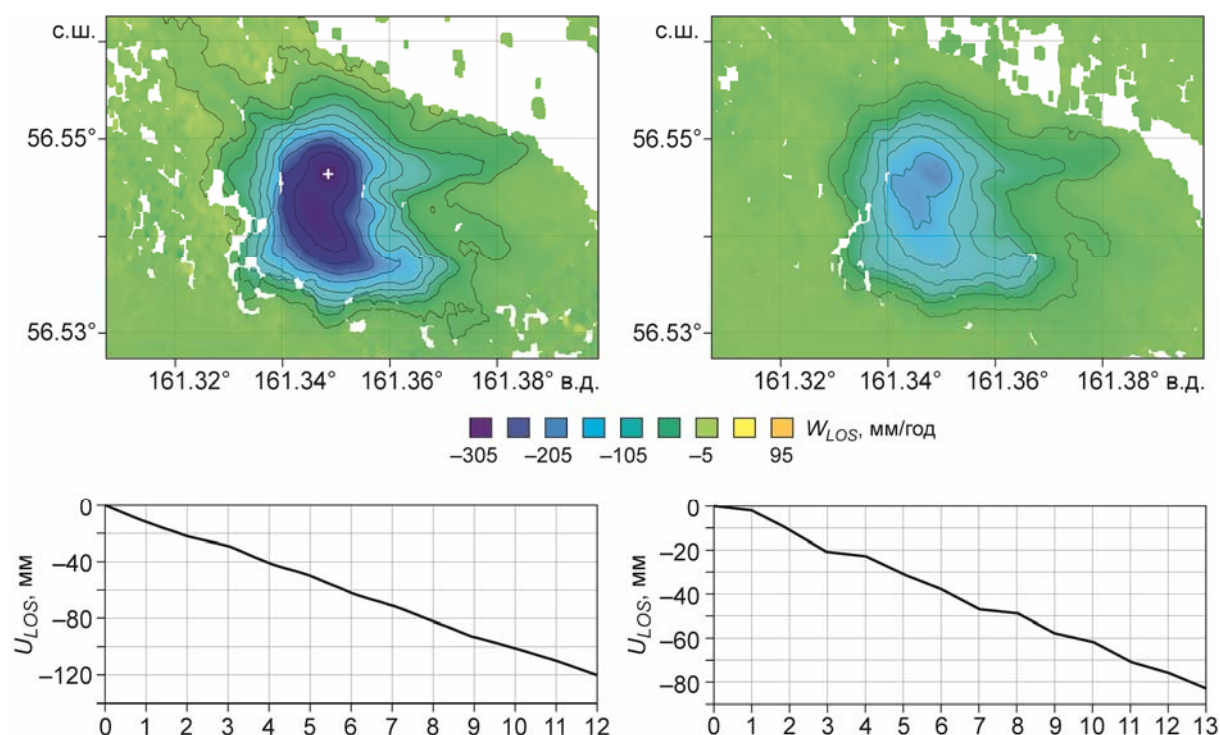
### Оценка смещений методами радарной интерферометрии

Интерферометрические методы давно и успешно используются для мониторинга и изучения вулканов, особенно в таких труднодоступных районах, как п-ов Камчатка. Исследованы смещения земной поверхности в кальдере Узон [Lundgren, Lu, 2006], на вулканах Кизимен [Ji et al., 2013], Толбачик [Lundgren et al., 2015; Михайлов и др., 2020], Карымский [Ji et al., 2018], Безымянный [Mania et al., 2019], Большая Удина [Сенюков и др., 2020], Корякский [Михайлов и др., 2021]. Применяются две основные технологии: определение смещений по паре снимков (технология *DInSAR*) и по сериям РСА-снимков (метод устойчивых отражателей *PS* [Ferretti, Prati, Rocca, 2001] и метод малых базовых линий *SBAS* [Berardino et al., 2002]). В отличие от *PS*, *SBAS* основан не на точечных постоянных отражателях (*Persistent Scatterers*), а на так называемых распределённых отражателях (*Distributed Scatterers*), которые встречаются гораздо чаще в природных условиях. Даже при наличии пространственной декорреляции распределённые отражатели могут демонстрировать хорошую когерентность на интерферограммах с большими временными базовыми линиями, т.е. выполненными с интервалом до нескольких лет, при условии, что пространственные базовые линии (расстояние между положением спутника при первой и второй съёмке) имеют низкие значения [Ferretti,

2014]. В отличие от метода *DInSAR*, при работе со множеством радарных изображений, можно устранять некоррелируемые во времени короткопериодные фазовые сигналы, которые в основном связаны с влиянием атмосферы. Это даёт возможность эффективно фильтровать атмосферные шумы. Также при анализе серий интерферограмм появляется возможность уточнять цифровую модель рельефа, ошибки в задании которой дают фазовый сдвиг, прямо пропорциональный величине пространственной базовой линии.

С помощью метода *SBAS* были построены карты средних скоростей смещений по серии снимков, выполненных спутником Сентинель-1А, за периоды 22.05–13.10.2020 г. и 05.05–08.10.2021 г. Средняя базовая линия по использованным для расчёта смещений интерферометрическим парам не превышала 100 м. В качестве опорной цифровой модели рельефа использовалась модель *SRTM1*. Точность определения средней скорости смещений за каждый год, которая оценивалась по дисперсии временного ряда относительно линейного тренда, составила 5 мм/год, точность оценки высот составляет 5 м. Расчёты проводились в программном комплексе *SARscape*.

Область оседаний дневной поверхности, совпадающая с положением пирокластического потока, показана на рис. 2. Максимальные значения скоростей оседания поверхности составили в 2020 г. порядка 300 мм/год, в 2021 г. – 200 мм/год в проекции на линию зондирования радара (*Line of Sight – LOS*).



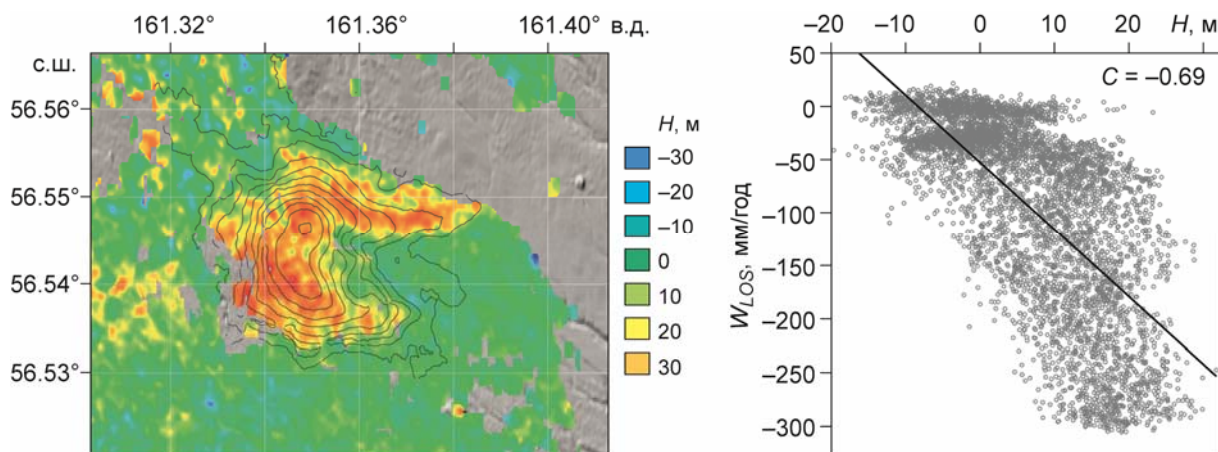
**Рис. 2.** Вверху: карты средних скоростей смещений ( $W_{LOS}$ , мм/год) в направлении на спутник (*LOS*). Шаг изолиний 30 мм/год. Внизу: временные ряды, показывающие динамику оседания поверхности в области с максимальной скоростью погружения (отмечена белым крестом вверху слева). На горизонтальной оси – номера снимков в сериях. Периоды наблюдений: 22.05–13.10.2020 г. (слева) и 05.05–08.10.2021 (справа)

**Fig. 2.** Above: maps of average displacement rates ( $W_{LOS}$ , mm/year) in the satellite direction (*LOS*). The step of isolines is 30 mm/year. Below: Time series showing the dynamics of surface subsidence in the area with the maximum sink rate (marked with a white cross above on the left). On the horizontal axis – the numbers of images in the series. Observation periods: May 22–October 13, 2020 (on the left) and May 5–October 8, 2021 (on the right)

Исходя из геометрии радарной съёмки и зная угол обзора радарного луча, можно пересчитать смещения, полученные в проекции  $LOS$ , в вертикальные смещения, в предположении, что горизонтальные смещения существенно меньше вертикальных. Поскольку угол обзора спутника Сентинель-1 равен  $38.77^\circ$ , вертикальные смещения должны составить 385 мм за 2020 г. и 257 мм за 2021 г.

### Мощность слоя пирокластических отложений

По серии РСА снимков была оценена мощность пирокластических отложений на момент начала исследования, т.е. на 2020 год. Метод  $SBAS$  позволяет построить цифровую модель рельефа, если в серии снимков 2020 г. использовать пары с максимальными базовыми линиями. Затем, используя серию снимков Сентинель-1А за период с 21.05 по 12.10.2018 г., была получена цифровая модель рельефа перед извержениями 2019 г. По разнице рельефов 2020 и 2018 гг. была рассчитана мощность пирокластических отложений в 2020 г. (рис. 3, *слева*). Максимальная мощность отложений составила около 30 м со средним значением примерно 6.2 м. Полученная карта мощности сопоставима с картой мощности, построенной в работе [Shevchenko et al., 2021] по данным аэрофото-снимков и оптических цифровых моделей рельефа, где максимальные толщины так же составили 30 м при среднем значении 12 м. На рис. 3, *справа* видно, что скорости оседания поверхности пирокластического потока коррелируют с его толщиной (коэффициент корреляции равен  $-0.69$ ) и их можно считать зависимыми величинами. Но при этом дисперсия относительно линейного тренда довольно существенная. Для объяснения этого явления было рассмотрено влияние термического остывания и компакции на усадку изверженных пород, и проведено сравнение результатов моделирования с данными, полученными по РСА-интерферометрии.



**Рис. 3.** Слева: карта мощности пирокластических отложений, полученная по разности цифровых моделей рельефа по снимкам, выполненным в 2018 и 2020 гг. Изолинии – значения скорости оседания поверхности потока за 2020 г. Шаг изолиний – 30 мм/год. Справа – корреляционная зависимость скорости оседания ( $W_{LOS}$ , мм/год) от мощности потока ( $H$ , м) с коэффициентом корреляции  $C$ . Прямая линия – линейный тренд

**Fig. 3.** On the left: map of the thickness of pyroclastic deposits obtained from the difference of digital elevation models from images taken in 2018 and 2020. The isolines are the values of the flow surface subsidence rates for 2020. The step of the isolines is 30 mm/year. On the right is the correlation dependence of the subsidence rate ( $W_{LOS}$ , mm/year) on the flow thickness ( $H$ , m) with the correlation coefficient  $C$ . The straight line is a linear trend

### Математическая модель и интерпретация смещений

Рассмотрим задачу термического остывания и уплотнения горячего пирокластического материала, расположенного на слое грунта. Поток достаточно однородный по горизонтали, его горизонтальные размеры существенно больше его толщины. Поэтому будем рассматривать одномерную задачу, вдоль вертикальной оси  $Oz$ , которая направлена вниз. Разобьём моделируемое пространство по вертикали на  $N$  элементов с шагом дискретизации  $\Delta z_i(t)$ ,  $i=1, \dots, N$ , который зависит от времени  $t$ . Для решения задачи термического остывания будем решать одномерное уравнение теплопроводности со следующими начальными и граничными условиями:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{term} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + W(z, t) \frac{\partial T}{\partial z},$$

$$T(z, t = 0) = \begin{cases} T_{pyr}, & \text{при } z = [-H(t); 0]; \\ dT_0 z, & \text{при } z = (0; H_{max}]; \end{cases}$$

$$T(z, t > 0) = \begin{cases} 0, & \text{при } z = -H(t); \\ dT_0 z, & \text{при } z = H_{max}, \end{cases}$$

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 ниже этой границы за два года можно пренебречь);  $T_{pyr}$  – начальная температура материала;  $dT_0$  – градиент температуры в грунте к моменту начала извержения принятый равным  $25 \text{ }^\circ\text{C/км}$ ;  $k_{term} = \lambda / (\rho(t)c_p)$  – температуропроводность ( $\lambda$  – теплопроводность;  $\rho(t)$  – плотность;  $c_p$  – удельная теплоёмкость).

Пусть коэффициент пористости асимптотически стремится к величине  $k_0$  при  $t \rightarrow \infty$ , где  $t$  – время. Тогда  $\bar{k} = k_0 + \Delta k$  – средняя начальная пористость в момент времени  $t=0$ ,  $\Delta k$  – суммарное изменение пористости;  $k(t)$  – пористость в момент времени  $t > 0$ . Тогда  $(1 - \bar{k})$  и  $(1 - k(t))$  – коэффициенты скелетной фракции в начальный и текущий моменты времени соответственно;  $\rho_0$  – плотность породы в начальный момент времени  $t=0$ . Определим деформацию ячейки сетки за счёт уплотнения среды при изменении пористости. Из закона сохранения массы скелета для каждого элемента сетки имеем

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

откуда получаем изменение размера ячейки сетки  $\Delta z_i(t)$  в момент времени  $t$ :

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

Пусть средняя по разрезу пористость экспоненциально зависит от времени как

$$k(t) = k_0 + \Delta k e^{-\frac{t}{a}}, \quad (2)$$

а плотность скелета зависит от температуры

$$\rho(t) = \rho(t, T) = \rho_0 (1 - \alpha(T(t) - T_0)), \quad (3)$$

где в (2)–(3)  $a$  – временной масштаб;  $\alpha$  – коэффициент термического расширения. Обозначим термическую компоненту оседания  $\delta z_1(t)$ , тогда из формулы (1) получаем

$$\Delta z(t) = \Delta z_0 \frac{1 - \bar{k}}{(1 - k(t))(1 - \alpha(T(t) - T_0))} = \delta z_1(t) \frac{1 - \bar{k}}{1 - k(t)}. \quad (4)$$

Если  $k(t)$  определяет среднее изменение пористости по всей толщине пирокластического потока, то можно сначала рассчитать термическую компоненту оседаний  $\delta z_1(t)$ , а затем вычислить суммарное оседание по формуле (4).

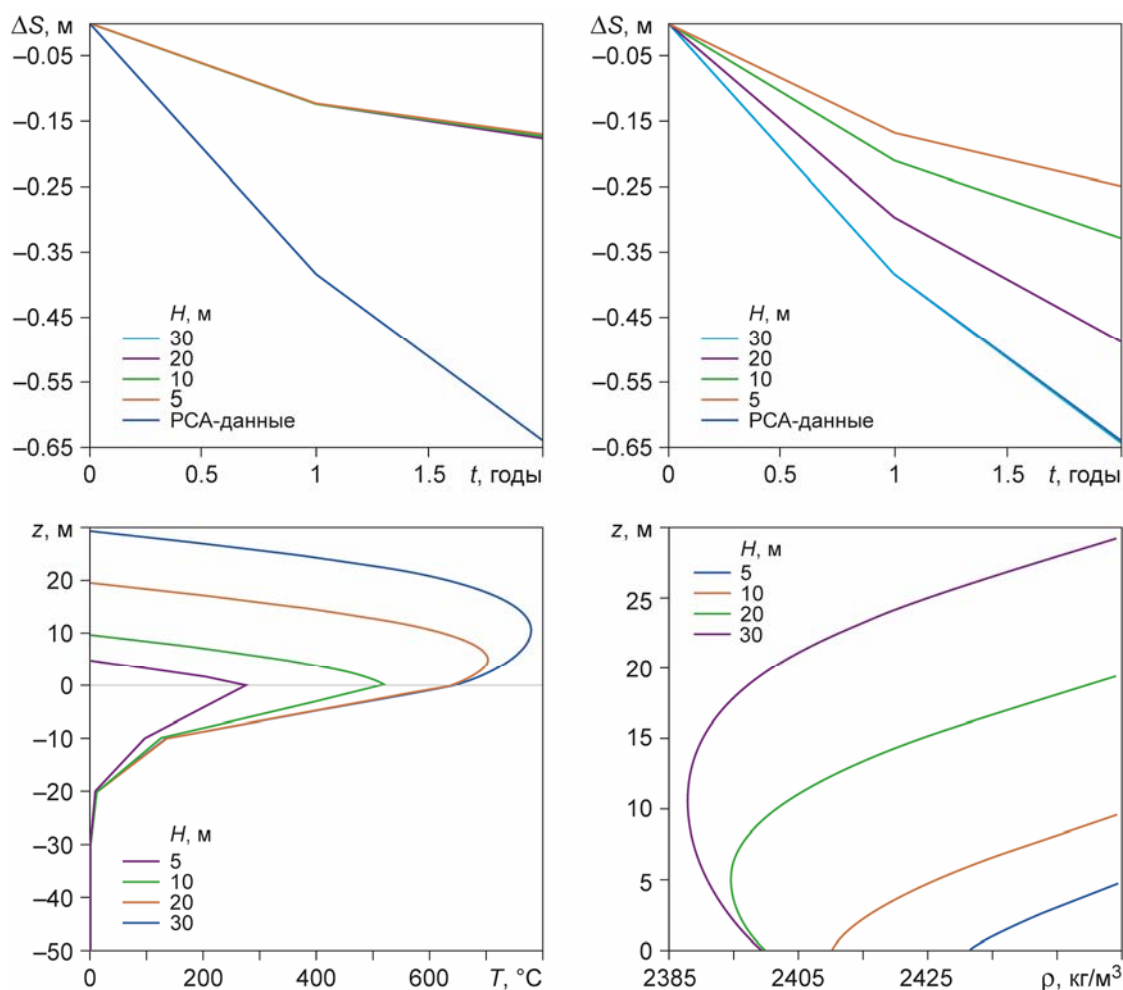
Для нижележащего слоя грунта деформация ячеек по  $z$  учитывает только температурное расширение/сжатие. Деформации, вызванные литостатическим давлением, при малой мощности слоя отложений (<30 м) составляют пренебрежимо малую величину порядка  $10^{-5}$ , поэтому в расчётах не учитываются.

### Выбор параметров модели

В работе [Гурина, 1998] приведены параметры пород пирокластических потоков 1964 г. вулкана Шивелуч, в том числе указано, что средняя плотность породы лежит в интервале  $1.19\text{--}1.50 \text{ г/см}^3$ , плотность андезитовых пород  $\rho_{and} = 2.74 \text{ г/см}^3$ , а объёмная пористость равна 0.5. Поскольку параметры пород оценивались более чем через 30 лет после формирования потока, непосредственно применить эти данные к оценке плотности через два года после извержения 29.08.2019 г. невозможно. Учитывая, что твёрдая фаза в нашем случае включает частицы тефры, а поры, по всей вероятности, не содержат воду (температура внутри пирокластического потока, полученная из термической задачи, сравнительно высокая), было взято более низкое значение средней плотности твёрдой фазы, равное  $2.4 \text{ г/см}^3$ . Отметим, что изменение плотности на несколько десятых слабо сказывается на оценке оседаний. Температура магм в момент извержения вулкана Шивелуч была оценена в работе [Dirksen et al., 2006] по данным за 2001–2004 гг. в  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ . Следуя работе [Сидоров, Дучков, 1989], теплопроводность андезитовой лавы и подстилающего слоя более древних вулканических пород  $\lambda$  была принята равной  $1.1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Численные эксперименты показали, что теплопроводность грунта очень слабо влияет на результат. Теплоёмкость лавы  $c_p$  принята равной  $10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ , грунта –  $1.4\cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ , коэффициент термического расширения  $\alpha=3.4\cdot 10^{-5}$ . Величина  $k_0$  в формуле (2) задана равной 0.5, т.е. средняя начальная пористость по разрезу потока равна  $k_0+\Delta k$ , а суммарное изменение пористости  $\Delta k$  было определено методом подбора. Начальный шаг сетки по оси  $z$  задан постоянным  $\Delta z_0=0.1 \text{ м}$ ; шаг по времени  $\tau=0.5 \text{ сут}$ .

### Результаты моделирования

Рассмотрим результаты моделирования в отсутствие экзогенных процессов, таких как размыв поверхностными водами, выветривание, эрозия, деградация и т.д. Оценим вначале скорость оседания за счёт остывания потока. На рис. 4, *вверху слева* показана величина оседаний за два года при различной мощности потока. При заданных выше физических свойствах среды мощность слоя залежи практически не влияет на величину погружения её поверхности и составляет в среднем за первый год 123 мм, а за второй – 52 мм (175 мм накопленной усадки за два года). Это связано с тем, что при мощности потока в 5 м к концу второго года он существенно остывает, температура на его подошве составляет около  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ . При мощности в 30 м значительная часть потока имеет температуру более  $650 \text{ }^\circ\text{C}$ . Полученная нами по спутниковым данным величина оседаний составляет 385 и 257 мм за первый и второй год (суммарно 642 мм), что, соответственно по годам примерно в 3 и в 5 раз больше, чем получено по термической модели. Следовательно, одним термическим оседанием невозможно объяснить наблюдаемое погружение, определённое по данным РСА-интерферометрии.



**Рис. 4.** Вверху: накопленное оседание пирокластических отложений за счёт остывания материала потока (слева) и охлаждения и компакциии (справа). Внизу: профили распределения температуры (слева) и плотностей (справа) через два года после извержения 29.08.2019 г. для модели охлаждения и компакциии. Разным цветом показаны полученные в результате моделирования зависимости при разных значениях мощности отложений ( $H$ , м)

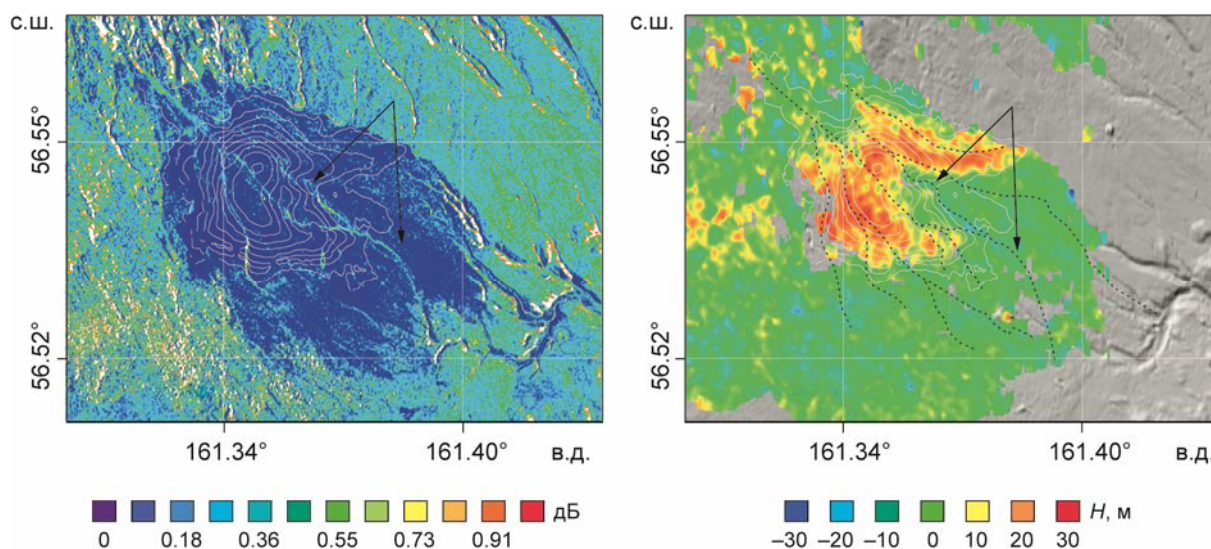
**Fig. 4.** Above: accumulated subsidence of pyroclastic deposits due to the cooling of the flow material (on the left) and cooling and compaction (on the right). Below: temperature (on the left) and density (on the right) distribution profiles two years after the eruption on August 29, 2019 for the cooling and compaction model. Different colors show the dependences obtained as a result of modeling at different values of the thickness of deposits ( $H$ , m)

Добавим к термической усадке деформации, связанные с уплотнением вещества за счёт изменения пористости со временем. Подберём параметры изменения пористости, при которых максимальная мощность слоя (30 м) оседает с максимальной скоростью, соответствующей спутниковым данным – 385 мм/год в 2020 г. и 257 мм/год в 2021 г. Наилучшее согласование расчётных и фактических данных для 30-метрового слоя получается при изменении пористости по закону (2) со следующими параметрами:  $a=5$  лет,  $\Delta k=0.023$  (см. рис. 4, вверху справа). Пористость при этом снизилась от  $\bar{k}=0.523$  до  $k(t)=0.515$  в 2021 г. На рис. 4, внизу слева показаны профили температуры к концу 2021 г.; на рис. 4, внизу справа приведены профили распределения плотности по глубине для различных толщин пирокластического потока также через два года.

Выше был рассмотрен случай, когда начальная температура отложившегося потока равна температуре лавы (850 °С). Предположим, что лава при извержении остыла более чем в два раза и средняя температура вещества в момент отложения пирокластического потока составила 400 °С. Тогда термическое оседание за первый год оказывается меньше измеренного более чем в 6.6 раз, а за второй год – более чем в 10.7 раз. Для наилучшего совпадения результатов расчётов с фактическими результатами необходимо увеличить в зависимости (2) параметр  $\Delta k$  до 0.027, при этом временной масштаб остаётся прежним  $a=5$  лет. В этом случае пористость изменяется от 0.527 в начальный момент до 0.518 через два года.

### Обсуждение результатов и заключение

Подбирая параметры в зависимости (4), можно получить смещения для слоя отложений любой мощности, совпадающие с интерферометрическими оценками, при отсутствии экзогенных процессов. Однако, как видно на рис. 3, *справа*, несмотря на хорошую коррелируемость данных (с коэффициентом  $-0.69$ ), наблюдается существенный разброс относительно линейного тренда. Скорости оседания слоёв толщиной от 5 до 30 м изменяются в широком диапазоне. Это указывает на влияние других, в частности эрозионных процессов. Средняя интенсивность отражённого радарного сигнала по снимкам спутника Сентинель-1А за период исследования 2020–2021 гг., которая, по сути, представляет собой аналог оптического изображения, приведена на рис 5, *слева*.



**Рис. 5.** Слева: средняя интенсивность отражённого радарного сигнала по снимкам Сентинель-1А за период 2020–2021 гг. Справа: карта мощности слоя пирокластических отложений извержения 29.08.2019 г. Изолинии – скорости оседания поверхности, полученные по РСА за 2020 г. с шагом 30 мм/год. Стрелки указывают на русла поверхностных водных потоков. Чёрный пунктир – следы поверхностных потоков, оцифрованные по карте интенсивности отражённого сигнала

**Fig. 5.** On the left: The average intensity of the reflected radar signal from Sentinel-1A images over the period of 2020–2021. On the right: map of the layer thickness of pyroclastic deposits of the eruption on August 29, 2019. Contours are the surface subsidence rates obtained from SAR for 2020 with the step of 30 mm/year. The arrows indicate the channels of surface water flows. Black dotted line – traces of surface flows, digitized according to the map of the reflected signal intensity



Видно, что склоны изрезаны множеством потоков, размывающих пирокластические отложения. Следы этих потоков трассируются в тех местах, где на карте мощности видно резкое уменьшение толщины отложений (см. рис. 5, *справа*). Мы полагаем, что эрозионные процессы ответственны за разброс скорости оседаний от величин, полученных по математической модели.

Полученные результаты позволяют заключить, что оседание пирокластического потока определяется тремя процессами – остыванием потока, уплотнением и размывом пород. Построенная математическая модель даёт возможность оценить относительную роль термической компоненты оседаний и оседаний за счёт компакциии пород.

Карты скоростей смещений поверхности вулкана, построенные по данным РСА-интерферометрии по сериям снимков спутника Сентинель-1А за 2020 и 2021 гг. в периоды с мая по октябрь, демонстрируют оседания в области пирокластического потока. Максимальные скорости оседаний составили в 2020 г. 385 мм/год, в 2021 г. – 257 мм/год. Мощность пирокластических отложений, оцененная по тем же снимкам, достигает 30 м.

Построенная термомеханическая модель, в которой учтена компакция отложений за счёт изменения во времени их пористости и плотности, показала, что для объяснения зависимости скорости оседаний поверхности потока от мощности пород достаточно предположить небольшое изменение пористости с 2019 по 2021 гг., которое в зависимости от начальной температуры потока составило от 1.5 до 1.7 %.

Разброс зависимости “скорость оседаний – мощность потока” объясняется процессами размыва пирокластических отложений. Следы многочисленных потоков хорошо видны на спутниковых снимках.

### **Благодарности**

Авторы благодарят Европейское космическое агентство за предоставленные снимки спутника Сентинель-1А.

### **Финансирование**

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки № 14.W03.31.0033 “Геофизические исследования, мониторинг и прогноз развития катастрофических геодинамических процессов на Дальнем Востоке РФ”.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Литература**

- Гирина О.А.* Пирокластические отложения современных извержений андезитовых вулканов Камчатки и их инженерно-геологические особенности. Владивосток: Дальнаука, 1998. 174 с. <http://repo.kscnet.ru/id/eprint/120>
- Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нурждаев А.А., Лупян Е.А.* Активность вулканов Камчатки и Курильских островов в 2019 г. и их опасность для авиации // Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы XXIII ежегодной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С.11–14.
- Горбач Н.В., Портнягин М.В.* Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч // Петрология. 2011. Т. 19, № 2. С.140–172.

- Мальшиев А.И. Жизнь вулкана. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 261 с.
- 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
- 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.
- Озеров А.Ю., Гирина О.А., Жаринов Н.А., Белоусов А.Б., Демянчук Ю.В. Извержения вулканов Северной группы Камчатки в начале XXI века // Вулканология и сейсмология. 2020. № 1. С.3–19. DOI: 10.31857/S0203030620010058
- Сенюков С.Л., Михайлов В.О., Нуждина И.Н., Киселева Е.А., Дрознина 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 спутниковой радарной интерферометрии для оценки возможного извержения потухшего вулкана Большая Удина // Вулканология и сейсмология. 2020. № 5. С.26–39. DOI: 10.31857/S0203030620050053
- Сидоров А.М., Дучков А.Д. Механизмы теплопереноса в горных породах. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1989. 96 с.
- 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, N 11. P.2375–2383.
- Dirksen O., Humphreys M.C.S., Pletchov P., Melnik O., Demyanchuk Y., Sparks R.S.J., Mahony S., The 2001–2004 dome-forming eruption of Shiveluch volcano, Kamchatka: Observation, petrological investigation and numerical modelling // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2006. V. 155, Is. 3–4. P.201–226. ISSN 0377-0273. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.03.029
- Ferretti A., Prati C., Rocca F., Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 2001. V. 39, N 1. P.8–20.
- Ferretti A. Satellite InSAR Data Reservoir Monitoring from Space. EAGE Publication by, 2014. 160 p. ISBN 978-90-73834-71-2
- Goltz A.E., Krawczynski M.J., Gavrilenko M., Gorbach N.V., Ruprecht Ph. Evidence for superhydrous primitive arc magmas from mafic enclaves at Shiveluch volcano, Kamchatka // Contrib Mineral Petrol. 2020. V. 175, N 115. P.1–26. https://doi.org/10.1007/s00410-020-01746-5
- 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. V. 256. P.87–95.
- Ji L., Izbekov P., Senyukov S., Lu Z. Deformation patterns, magma supply, and magma storage at Karymsky Volcanic Center, Kamchatka, Russia, 2000–2010, revealed by InSAR // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2018. V. 352. P.106–116.
- Lundgren P., Lu Z. Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations // Geophysical Research Letters. 2006. V. 33, L06301. doi: 10.1029/2005GL025181
- Lundgren P., Kiryukhin A., Milillo P., Samsonov S. Dike model for the 2012–2013 Tolbachik eruption constrained by satellite radar interferometry observations // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. V. 307. P.79–88. http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.05.011
- Mania R., Walter T.R., Belousova M., Belousov A., Senyukov S.L. Deformations and morphology changes associated with the 2016–2017 eruption sequence at Bezymianny Volcano, Kamchatka // Remote Sensing. 2019. V. 11, Is. 1278. 23 p.
- Shevchenko A.V., Dvigalo V.N., Zorn E.U., Vassileva M.S., Massimetti F., Walter T.R., Svirid I.Y., Chirkov S.A., Ozerov A.Y., Tsvetkov V.A., Borisov I.A. Constructive and Destructive Processes During the 2018–2019 Eruption Episode at Shiveluch Volcano, Kamchatka, Studied From Satellite and Aerial Data // Front. Earth Sci. 2021. V. 9, Is. 680051. doi: 10.3389/feart.2021.680051

*Сведения об авторах*

**ВОЛКОВА Мария Сергеевна** – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-85-77. E-mail: msvolkova6177@gmail.com

**МИХАЙЛОВ Валентин Олегович** – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-85-77. E-mail: mikh@ifz.ru

**MODEL OF PYROCLASTIC FLOW SURFACE  
SUBSIDENCE: SHIVELUCH VOLCANO (KAMCHATKA),  
ERUPTION ON 29.08.2019**

M.S. Volkova, V.O. Mikhailov

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
Corresponding author: M.S. Volkova (e-mail: msvolkova6177@gmail.com)*

**Abstract.** Possible reasons for the subsidence of the pyroclastic flow surface formed on the slopes of the Shiveluch volcano (Kamchatka) during the eruption of August 29, 2019 are studied. According to SAR interferometry data from the series of images of the European Space Agency Sentinel-1A satellite for the periods of 05–10.2020 and 05–10.2021 maps of displacement velocities of the volcano surface were constructed. An area with large subsidence was found, coinciding with the pyroclastic flow area on the southeastern slope. The maximum subsidence rates were 385 mm/year in 2020 and 257 mm/year in 2021. The thickness of pyroclastic deposits was estimated from radar images for 2020. The dependence of the sedimentation rate on the flow thickness at a sufficiently high correlation coefficient ( $-0.69$ ) has a significant spread.

A thermomechanical model has been constructed, which takes into account the compaction of deposits due to the changes in their porosity and density over time. According to the model, to explain the dependence of the flow surface subsidence rate on the rock thickness, it is sufficient to assume that, in addition to subsidence, when the flow cools, a slight change in porosity occurs, which, depending on the initial temperature of the flow, ranged from 1.5 to 1.7 % for the period from 2019 to 2021. The spread in the dependence “subsidence rate – flow thickness” is explained by the processes of erosion of pyroclastic deposits.

**Keywords:** pyroclastic flow, Shiveluch volcano, SAR interferometry, Sentinel-1A, thermomechanical model, flow surface subsidence.

**Acknowledgements**

The authors are grateful to the European Space Agency for providing Sentinel-1A satellite images.

**Funding**

This work was supported by grant No. 14.W03.31.0033 of the Ministry of Education and Science “Geophysical research, monitoring and forecasting of catastrophic geodynamic processes in the Russian Far East”.

**Conflict of interest**

The authors declare they have no conflict of interest.

## References

- 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, vol. 40, no. 11, pp. 2375-2383.
- Dirksen O., Humphreys M.C.S., Pletchov P., Melnik O., Demyanchuk Y., Sparks R.S.J., Mahony S., The 2001–2004 dome-forming eruption of Shiveluch volcano, Kamchatka: Observation, petrological investigation and numerical modelling, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2006, vol. 155, iss. 3–4, pp. 201-226, ISSN 0377-0273. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.03.029>
- Ferretti A., Prati C., Rocca F., Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2001, v. 39, no. 1, pp. 8-20.
- Ferretti A., *Satellite InSAR Data Reservoir Monitoring from Space*, EAGE Publication bv, 2014, 160 p. ISBN 978-90-73834-71-2
- Girina O.A., *Piroklasticheskie otlozheniya sovremennykh izverzhenii andezitovykh vulkanov Kamchatki i ikh inzhenerno-geologicheskie osobennosti* (Pyroclastic deposits of modern eruptions of andesitic volcanoes of Kamchatka and their engineering-geological features), Vladivostok: Dal'nauka, 1998, 174 p. [In Russian].
- Girina O.A., Manevich A.G., Mel'nikov D.V., Nuzhdaev A.A., Lupyan E.A., Activity of volcanoes of Kamchatka and the Kuril Islands in 2019 and their danger to aviation, in *Vulkanizm i svyazannyye s nim protsessy: Materialy XXIII ezhegodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi Dnyu vulkanologa* (Volcanism and related processes: Proceedings of the XXIII Annual Scientific Conference dedicated to the Volcanologist Day), Petropavlovsk-Kamchatskii: IViS DVO RAN, 2020, pp. 11-14. [In Russian].
- Goltz A.E., Krawczynski M.J., Gavrilenko M., Gorbach N.V., Ruprecht Ph., Evidence for superhydrous primitive arc magmas from mafic enclaves at Shiveluch volcano, Kamchatka, *Contrib Mineral Petrol.*, 2020, vol. 175, no. 115, pp. 1-26. <https://doi.org/10.1007/s00410-020-01746-5>
- 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.
- 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, vol. 256, pp. 87-95.
- Ji L., Izbekov P., Senyukov S., Lu Z., Deformation patterns, magma supply, and magma storage at Karymsky Volcanic Center, Kamchatka, Russia, 2000–2010, revealed by InSAR, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2018, vol. 352, pp. 106-116.
- Lundgren P., Lu Z., Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations, *Geophysical Research Letters*, 2006, vol. 33, L06301. doi: 10.1029/2005GL025181
- Lundgren P., Kiryukhin A., Milillo P., Samsonov S., Dike model for the 2012–2013 Tolbachik eruption constrained by satellite radar interferometry observations, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, vol. 307, pp. 79-88. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.05.011>
- Malyshev A.I., *Zhizn' vulkana* (Volcano life), Ekaterinburg: UrO RAN, 2000, 260 p. [In Russian].
- Mania R., Walter T.R., Belousova M., Belousov A., Senyukov S.L., Deformations and morphology changes associated with the 2016–2017 eruption sequence at Bezymianny Volcano, Kamchatka, *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, iss. 1278, 23 p.
- Mikhailov V.O., Volkova M.S., Timoshkina E.P., Shapiro N.M., Babayantz I.P., Dmitriev P.N., Khairetdinov S.A., Analysis of displacements of the lava flow surface of the 2012–2013 Tolbachik fissure eruption by SAR interferometry, *Geofizicheskie issledovaniya* (Geophysical Research), 2020, vol. 21, no. 4, pp. 21-34. [In Russian]. <https://doi.org/10.21455/gr2020.4-2>
- Mikhailov V.O., Volkova M.S., Timoshkina E.P., Shapiro N.M., Smirnov V.B., On the Connection between the Koryaksky Volcano Activation in 2008–2009 and the Underlying Magmatic Processes, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2021, vol. 57, no. 6, pp. 819-824. doi: 10.1134/S1069351321060045
- Ozerov A.Y., Girina O.A., Zharinov N.A., Belousov A.B., Demyanchuk Y.V., Eruptions in the northern group of volcanoes, in Kamchatka, during the early 21st century, *Journal of Volcanology and Seismology*, 2020, vol. 14, no. 1, pp. 1-17. DOI: 10.1134/S0742046320010054
- Senyukov S.L., Mikhailov V.O., Nuzhdina I.N., Kiseleva E.A., Droznina S.Ya., Timofeeva V.A., Volkova M.S., Shapiro N.M., Kozhevnikova T.Yu., Nazarova Z.A., Sobolevskaya O.V., A Joint Study of Seismicity and SAR Interferometry Observations for Assessing the Possibility of an Eruption of the Dormant Bolshaya Udina Volcano, *Journal of Volcanology and Seismology*, 2020, vol. 14, no. 5, pp. 305-317. DOI: 10.1134/S074204632005005X

Shevchenko A.V., Dvigalo V.N., Zorn E.U., Vassileva M.S., Massimetti F., Walter T.R., Svirid I.Y., Chirkov S.A., Ozerov A.Y., Tsvetkov V.A., Borisov I.A., Constructive and Destructive Processes During the 2018–2019 Eruption Episode at Shiveluch Volcano, Kamchatka, Studied from Satellite and Aerial Data, *Front. Earth Sci.*, 2021, vol. 9, iss. 680051. doi: 10.3389/feart.2021.680051

Sidorov A.M., Duchkov A.D., *Mekhanizmy teploperenosa v gornykh porodakh* (Heat transfer mechanisms in rocks), Novosibirsk: Nauka, 1989, 96 p. [In Russian].

#### *About the authors*

**VOLKOVA Maria Sergeevna** – Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254-85-77. E-mail: msvolkova6177@gmail.com

**MIKHAILOV Valentin Olegovich** – Dr Sci. (Phys.-Math.), Corresponding Member of RAS, Head of the Laboratory, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254-85-77. E-mail: mikh@ifz.ru