

УДК 550.31

## О СВЯЗИ АКТИВИЗАЦИИ ВУЛКАНА КОРЯКСКИЙ В 2008–2009 гг. С ГЛУБИННЫМИ МАГМАТИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

© 2021 г. В. О. Михайлов<sup>1,2,\*</sup>, М. С. Волкова<sup>1</sup>, Е. П. Тимошкина<sup>1</sup>,  
Н. М. Шапиро<sup>1,3</sup>, В. Б. Смирнов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт наук о Земле, Университет Гренобль-Альпы, CNRS (UMR5275), г. Гренобль, Франция

\*E-mail: mikh@ifz.ru

Поступила в редакцию 15.03.2021 г.

После доработки 22.03.2021 г.

Принята к публикации 22.03.2021 г.

Последняя активизация вулкана Корякский в 2008–2009 гг. сопровождалась интенсивной фумарольной и сейсмической активностью. Своего максимума вулканическая деятельность достигла в марте–апреле 2009 г., когда пепловый шлейф поднимался на высоту до 5.5 км и простирался на расстояние более 600 км. Актуальным для понимания динамики вулканических процессов и прогноза дальнейшего развития событий является вопрос: извержение было связано с подъемом магмы под вулканическую постройку или вызвано растрескиванием пород фундамента вулкана и проникновением подземных вод в зону высоких температур? Методами спутниковой радарной интерферометрии на основе снимков японского спутника АЛОС-1 впервые определены смещения склонов вулкана Корякский в период его последней активизации. Смещения достигают 25 см и не могут быть объяснены формированием слоя пепловых отложений или склоновыми процессами. Наиболее вероятной причиной смещений следует признать внедрение магматического материала в постройку вулкана с формированием трещины с глубиной нижней кромки 0.5 км над уровнем моря, с размерами по простиранию 1.0 км, по падению 2.4 км, с углом падения от 45 до 60°. Следовательно, происходящие под вулканом процессы могут создавать опасность для расположенных в его окрестности населенных пунктов и объектов инфраструктуры и требуют непрерывного мониторинга.

*Ключевые слова:* вулкан Корякский, извержение 2008–2009 гг., спутниковая радарная интерферометрия, смещения склонов, внедрение дайки.

DOI: 10.31857/S0002333721060041

### ВВЕДЕНИЕ

Корякский стратовулкан расположен в южной части полуострова Камчатка. Это наиболее крупный вулкан в Авачинско-Корякской группе вулканов (АКГВ), расположенных в непосредственной близости от г. Петропавловск-Камчатский – крупнейшего города полуострова. Изучение вулканических и сейсмических процессов, происходящих в районе АКГВ, периодов и причин их активизации, прогноз извержений критически важны для жителей этой наиболее плотно заселенной части полуострова.

Согласно работе [Иванов, 2010], начиная с 19-го века произошло как минимум 15 активизаций вулкана Корякский. При этом три из них, в 1926, 1956–1957 и 2008–2009 гг. были наиболее мощными и сопровождалась выносом больших объемов пара и газов с примесью пепла. Последние извержения начались в ноябре 2008 г., но уже с

марта 2008 г. в районе вулкана стала регистрироваться высокая сейсмическая активность (максимальный энергетический класс  $K_{max} = 8$ ), которая продолжалась и в 2009 г. Столь значительное количество сейсмических событий наблюдалось впервые с ноября 1992 г., когда Камчатский филиал Единой Геофизической службы РАН (КФ ЕГС РАН) начал детальные наблюдения на АКГВ. Фумаролы располагались на западном склоне около вершины вулкана, вдоль трещины, образованной во время извержений 1956–1957 гг. Своего максимума вулканическая деятельность достигла в марте–апреле 2009 г. Видимый шлейф поднимался на высоту до 5.5 км и простирался на расстояния более 600 км [Гирина и др., 2010].

Часть исследователей связывает активизацию вулкана Корякский с процессами в магматическом очаге. Так, автор работы [Иванов, 2010] относит извержение не к фреатическому, а к газово-

му извержению с выносом пепла. Он заключил, что это извержение связано с подъемом магмы и ее внедрением на глубину 10–14 км в примыкающий к вулкану с севера субмеридиональный разлом. Анализ каталогов КФ ЕГС РАН за период 01.2000–02.2013 гг., содержащих более 3000 землетрясений, произошедших в постройкиках и в фундаменте АКГВ показал, что активизация вулкана Корякский в 2008–2009 гг. была вызвана инжекцией магмы из магматических очагов Авачинского и Корякского вулканов [Кирюхин и др., 2017]. Авторы этой работы считают, что подготовка извержения началась с насыщения магмой кóрового очага, кровля которого располагается на глубине 3 км ниже уровня моря. Далее произошла инжекция магмы в субмеридиональную зону, размером  $7.5 \times 2.5$  км в диапазоне глубин 2–5 км ниже уровня моря в северном секторе вулкана Корякский, которая совпала с наиболее интенсивным периодом вершинного парогазового извержения (02.2009 г.–03.2010 г.). Процесс инжекции магмы сопровождался внедрением даек с углами падения от  $34^\circ$  до  $87^\circ$ . Моделирование инжекции магмы выполнено в работе [Кирюхин и др., 2017] для трещины с параметрами: угол падения  $60^\circ$ , размеры  $2 \times 2$  км<sup>2</sup>, глубина 4 км ниже уровня моря.

Томографические модели области АКГВ, построенные с использованием каталогов КФ ЕГС РАН за период 01.01 2009–31.12.2018 гг. [Bushenkova et al., 2019] и шумовой сейсмической томографии [Koulakov et al., 2014], показывают присутствие под вулканом Корякский низкоскоростной зоны на глубине  $\sim 7$  км. Эта зона может быть ассоциирована с постоянным магматическим очагом, откуда начался подъем магмы.

Анализ данных тепловизионного исследования пепло-газовых взрывных шлейфов, выполненный в работе [Гордеев, Дрознин, 2010], дает оценку общей массы водяного пара за время извержения (за 100 дней) равную  $3 \times 10^5$  т, и оценку термальной энергии извержения – в  $10^9$  МДж. Источник такого количества тепла логично связать с внедрением магмы. Такая энергия может быть получена, например, при кристаллизации магмы объемом  $10^6$  м<sup>3</sup> [Гордеев, Дрознин, 2010].

В то же время авторы работ [Аникин и др., 2011; Максимов и др., 2011], на основе результатов гранулометрического, химического и минералогического анализов пеплов извержения 2008–2009 гг., заключили, что активизация 2008–2009 гг. непосредственно не связана с движением магмы в вулканическом очаге, а вызвана растрескиванием прогретых пород фундамента вулкана и проникновением подземных вод в зону высоких температур. Аналогичный вывод содержится в работе [Гирина и др., 2010]. Вопрос о причинах интен-

сивной сейсмичности в широком диапазоне глубин в этих работах не обсуждается.

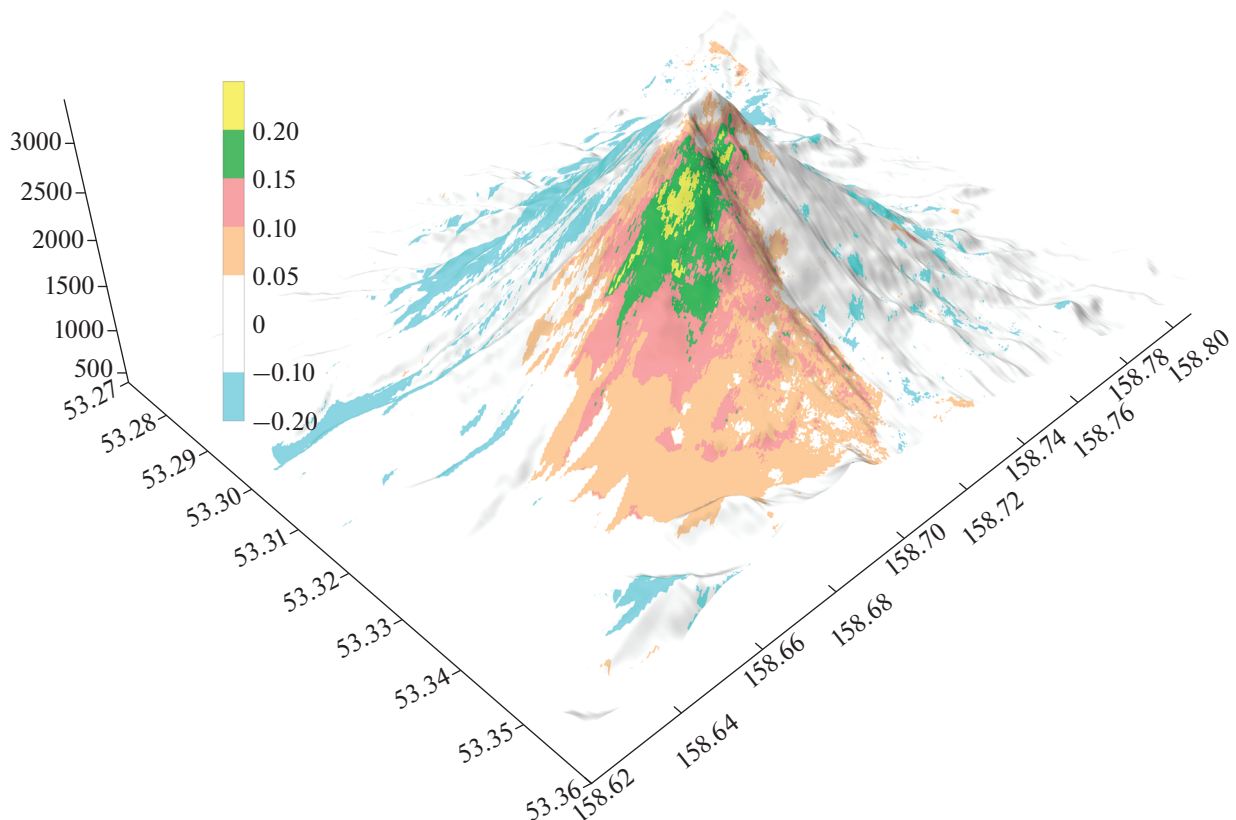
Итак, весьма актуальный вопрос состоит в том, с чем связана активизация вулкана и есть ли свидетельства подъема магмы под вулканическую постройку? Решение вопроса важно не только для понимания динамики вулканических процессов, но и для прогноза дальнейшего развития событий и их опасности для населения, инфраструктуры и авиации.

Данные спутниковой радарной интерферометрии впервые позволили определить смещения склонов вулкана Корякский в период 2008–2009 гг. и, тем самым, внести вклад в решение поставленного вопроса. В настоящей работе приведены результаты оценки смещений поверхности вулкана на основе снимков японского спутника АЛОС-1, и интерпретация поля смещений в рамках модели формирования дайки под поверхностью вулкана. В ЗАКЛЮЧЕНИИ дано обсуждение возможных причин активизации вулкана.

#### ОЦЕНКА СМЕЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ВУЛКАНА КОРЯКСКИЙ МЕТОДАМИ РАДАРНОЙ СПУТНИКОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Метод оценки смещений по данным спутниковой съемки, выполняемой радарными с синтезированной апертурой (РСА интерферометрия), состоит в следующем. Радар в определенном диапазоне длин волн излучает и принимает отраженный сигнал. Изображение радарного снимка представляет собой матрицу комплексных чисел, содержащих амплитуду и фазу отраженного сигнала. Если имеется два таких снимка из близких точек, то, зная высоту спутника над эллипсоидом, расстояние (базовую линию) между точками съемки и угол падения зондирующего луча, можно найти высоту элемента земной поверхности над эллипсоидом – цифровую модель рельефа (ЦМР). Радарный сигнал, отраженный при повторной съемке от некоторого элемента на поверхности Земли, меняет свою фазу из-за изменения положения радара и из-за возможных пространственных смещений отражающего элемента во времени, поэтому сигнал из двух разных точек съемки приходит с разной фазой. Пиксельное изображение, значениями которого являются разности фаз, и есть дифференциальная интерферограмма. Используя полученную ранее ЦМР, можно определить величину смещения отражающего элемента за время между съемками (см., например, [Дмитриев и др., 2012; Михайлов и др., 2013]).

Съемка ведется спутниками в различных частотных диапазонах. В сложных условиях Камчатского региона для интерферометрической об-



**Рис. 1** Смещения (цветовая шкала в метрах), полученные по парной интерферограмме, построенной по снимкам 16.08.2007 г. и 06.10.2009 г. Отрицательные значения – смещения от спутника, положительные – к спутнику. Теневой рельеф построен по ЦМР SRTM. Вертикальная шкала – высоты рельефа в метрах, горизонтальные – координаты в градусах.

работки наиболее пригодны снимки  $C$ -диапазона (длина волны  $\lambda = 5.6$  см) и особенно  $L$ -диапазона ( $\lambda = 23.6$  см), поскольку, чем больше  $\lambda$ , тем лучше проникающая способность излучения и, соответственно, меньше сказывается на качестве результата обработка временная декорреляция, связанная с влиянием атмосферных помех, снегового покрова, растительности.

Для периода активизации вулкана Корякский в базе японского космического агентства JAXA найдено семь снимков спутника ALOS-1, из которых один был отбракован по причине большой базовой линии и низкой когерентности. Снимки были выполнены 21.06.2006 г., 16.08.2007 г., 18.05.2008 г., 06.10.2009 г., 24.05.2010 г., 24.08.2010 г., 09.10.2010 г.

Для выбранного региона АКГВ были рассчитаны интерферограммы для различных пар. Наилучший результат получен для пары снимков 16.08.2007 г. и 06.10.2009 г., интервал съемки которых полностью покрывает период извержения. Важно, что в момент съемки снежный покров на значительной части склонов отсутствовал.

Расчет интерферограмм выполнен с использованием программного пакета SARscape с осреднением пикселей перпендикулярно орбите, так что размер ячейки разрешения составил  $14.98 \times 12.29$  м. Фильтрация фазы выполнялась методом Гольдштейна. Когерентность пары снимков высокая для природных ландшафтов ( $>0.6$ ). Поскольку смещения определяются по фазовому сдвигу сигналов, отраженных от одной и той же площадки при повторной съемке, смещения на интерферограмме выражены в радианах и свернуты по модулю  $2\pi$ . Полная фаза определяется в процессе ее развертки, т.е. добавления числа полных периодов, соответствующих разности хода волн. Для развертки использовался метод MCF (*minimum coast flow*). После перехода от радарных координат к географическим, построена карта смещений в метрах (рис.1).

Смещения определяются в направлении на спутник. Их значения на выбранной области находятся в интервале от  $-33$  (от спутника) до  $22$  см (к спутнику). Если считать, что смещения происходят в основном по вертикали, то при среднем

угле наклона зондирующего луча спутника  $38.69^\circ$ , значения смещений на спутник следует умножить на 1.28.

Области отрицательных смещений фиксируются на склонах всех вулканов на снимке и могут быть, в первую очередь, связаны с эрозией. В пределах снимка обнаруживается всего одна область поднятий, на северо-западном склоне вулкана Корякский, вокруг области извержения 2008–2009 гг. Значения смещений у подножия составляют 9–15 см и увеличиваются к вершине до 20–22 см. В предположении чисто вертикальных смещений, у вершины смещения превосходят 28 см.

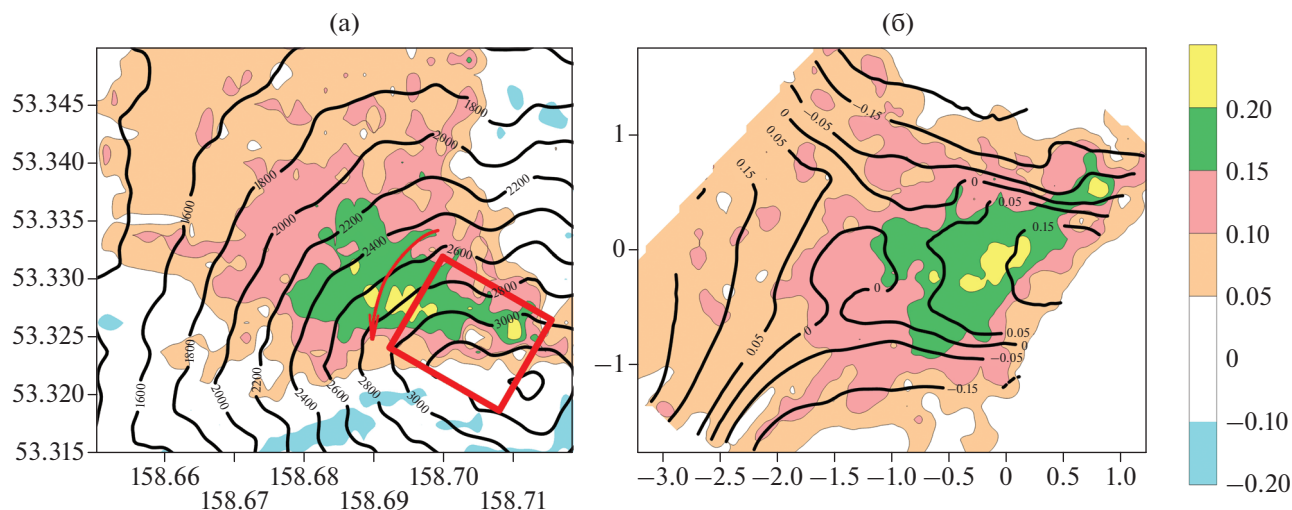
Подчеркнем, что положительные смещения на северо-западном склоне вулкана Корякский трудно ассоциировать с увеличением мощности снегового покрова и ледников у вершины или с формированием слоя пепловых отложений. Согласно работе [Максимов и др., 2011] пеплы, как правило, имели незначительную мощность и уже на небольшом отдалении от эруптивного центра лежали отдельными пятнами на снегу. В работе [Максимов и др., 2011] сообщается о пепловых отложениях мощностью в первые сантиметры. Это четко видно и на многих фотографиях в Интернете, и в статьях (см. например, [Гирина и др., 2010; Иванов и др., 2010; Максимов и др., 2011]). Более того, сообщается о таянии ледников и формировании на них глубоких провалов, вследствие понижения отражательной способности льда. Эти процессы должны были приводить к опусканию поверхности. Следовательно, поднятия поверхности вулкана амплитудой до 25 см не могут быть связаны с образованием слоя пепла.

Постоянные пепловые выбросы на протяжении всего периода извержения 2008–2009 гг., как и анализ сейсмичности [Кирюхин и др., 2017] указывают на то, что магма могла подступать близко к поверхности вулкана. Суммарный объем поднятий на северо-западном склоне вулкана (рис. 1) равен  $1.3 \times 10^6 \text{ м}^3$ . В модели расширяющейся трещины [Okada, 1985] он примерно равен объему раскрывшегося пространства. Это очень близко к полученной в работе [Гордеев, Дроздин, 2010] оценке объема магмы ( $10^6 \text{ м}^3$ ), остывание которой необходимо для формирования зарегистрированного выброса пара и к величине раскрытия трещины объемом  $1.2 \times 10^6 \text{ м}^3$  в модели [Кирюхин и др., 2017]. Все это указывает на то, что поднятия склона вулкана, как и другие наблюдавшиеся процессы, скорее всего, связаны с внедрением магматического материала. Рассмотрим эту гипотезу подробно.

## ЧИСЛЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛЯ СМЕЩЕНИЙ

Для интерпретации поля смещений было использовано решение [Okada, 1985] о деформации поверхности упругого полупространства в результате смещений по расположенной в нем прямоугольной трещине. В общем случае вектор смещений включает три компонента: расширение ( $TS$  *tensile*); сброс или надвиг, параллельно падению ( $DS$  – *dip-slip*); сдвиг параллельно простиранию ( $SS$  – *strike-slip*). Проблема применения этого решения в нашем случае состоит в том, что оно получено для смещений по трещине, расположенной в упругом полупространстве с горизонтальной свободной поверхностью. В пределах области смещений, показанной на рис. 1, высота рельефа меняется от 1300 до 3450 м (рис. 2а), поэтому пренебрежение реальным рельефом может привести к ошибкам. Для ослабления влияния рельефа, карта смещений была пересчитана в локальные декартовы координаты, а рельеф в области поля смещений на спутник со значениями  $>10$  см аппроксимирован плоскостью. Далее был осуществлен поворот системы координат вокруг оси  $Oz$  на угол  $43.03^\circ$  (направление поворота показано красной стрелкой на рис. 2а) так, чтобы ось  $Ox$  была параллельна проекции вектора градиента аппроксимирующей плоскости на плоскость  $xOy$  (рис. 2б). В пределах карты смещений высоты аппроксимирующей плоскости меняются на 2.15 км, а высоты рельефа относительно этой плоскости (рис. 2б) лежат в пределах от  $-220$  до 220 м.

Далее был осуществлен еще один поворот координат вокруг оси  $Oy$  на угол  $27.3^\circ$  так, чтобы ось  $Oz$  была перпендикулярна аппроксимирующей плоскости. В этих новых координатах аппроксимирующая рельеф плоскость совпадает со свободной поверхностью упругого полупространства, а отклонения остаточного рельефа (рис. 2б) оказываются малыми по сравнению с глубиной трещины. Теперь в формулах [Okada, 1985] в качестве расстояния от трещины до земной поверхности можно использовать либо расстояние до аппроксимирующей плоскости, либо еще и добавить высоту локального рельефа над этой плоскостью. Расчеты показали, что при имеющихся высотах локального рельефа это не вносит заметных изменений в решение. После решения обратной задачи поле смещений на поверхности модели поворачивается обратно в локальную систему координат (рис. 2б) и рассчитывается смещение в направлении на спутник с использованием азимута орбиты и угла наклона зондирующего луча (для восходящей орбиты спутника АЛОС-1 они равны  $-8.16^\circ$  и  $38.69^\circ$  соответственно).



**Рис. 2.** Смещения в направлении на спутник (цветовая шкала, метры) на западном и северо-западном склоне вулкана Корякский: (а) — карта в географических координатах, изолинии — высота над уровнем моря в м. Красная стрелка — направление поворота вокруг оси  $Oz$ ; (б) — карта в локальных декартовых координатах после вычитания аппроксимирующей локальный рельеф плоскости и поворота вокруг оси  $Oz$ . Изолинии — высота рельефа над аппроксимирующей плоскостью в м.

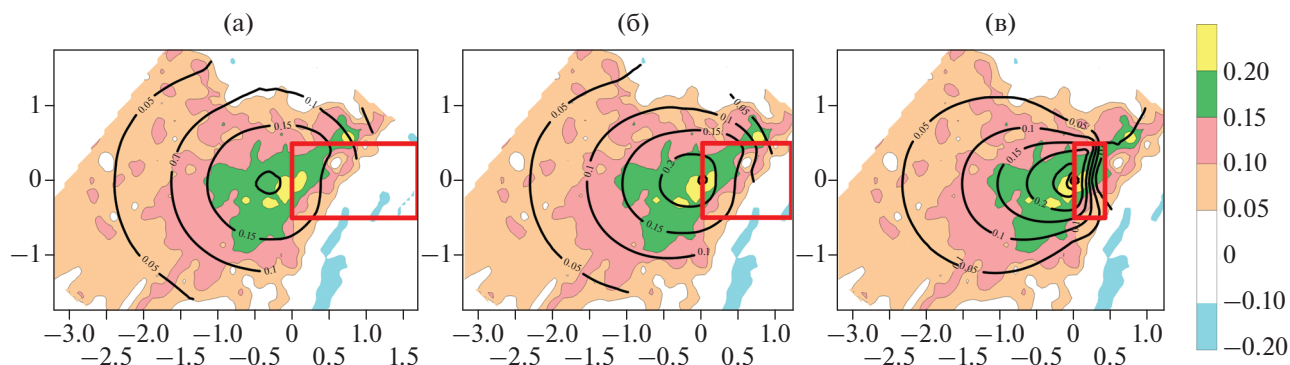
Решение из работы [Okada, 1985] широко используется при моделировании сейсмических и вулканических процессов, поэтому вопросы влияние топографии и неоднородности строения среды неоднократно обсуждались в литературе (см., например [Armigliato, Tinti, 2003] и приведен там библиографию). В основном влияние топографии определяется отношением перепада ее высот к глубине источника деформаций. В нашем случае колебания рельефа относительно аппроксимирующей плоскости составляют 0.2 км, а расстояние до источника деформации (дайки), поэтому расстояние до центра источника деформаций, в зависимости от принятого угла падения, составляет 1.5–2.0 км.

В решении [Okada, 1985] трещина аппроксимируется прямоугольным элементом или набором таких элементов. Мы ограничились одним прямоугольным элементом, что обеспечивает численную устойчивость обратной задачи. Прямоугольный элемент характеризуется десятью параметрами. Это три координаты середины нижней грани прямоугольника; его размеры по падению и простиранию; углы падения и простирания; три компоненты вектора смещений ( $TS$ ,  $DS$  и  $SS$ ). Поле смещений на поверхности является линейной функцией трех компонент вектора смещений, зависимость от остальных параметров нелинейная.

Размер области смещений и характерное расстояние от максимума до полумаксимума поля смещений на земной поверхности зависит от глубины трещины и ее размеров. При выборе параметров прямоугольника мы ориентировались на

результаты анализа распределения сейсмических событий, в частности на рис. 4 работы [Кирюхин и др., 2017], на котором верхний кластер землетрясений располагается под вулканом Корякский на уровне от 0.5 км над уровнем моря и выше. Размер трещины, для которой выполнялось моделирование в этой работе был  $2 \times 2 \text{ км}^2$ , угол падения  $60^\circ$ . Мы расположили нижнюю грань прямоугольного элемента на глубине 0.5 км выше уровня моря, исходя из размеров области смещений. Размер по падению задан 2.4 км, по простиранию 1.0 км. Угол падения варьировали в пределах  $45\text{--}80^\circ$ . Координаты середины нижней грани прямоугольника и его простирание легко выбрать путем смещения друг относительно друга карт расчетного и измеренного полей смещений. Следуя работе [Кирюхин и др., 2017] мы положили смещения вдоль простирания трещины равными нулю ( $SS=0$ ) и искали две компоненты: расширение ( $TS$ ) и смещение по падению ( $DS$ ), путем решения системы линейных уравнений.

Наилучшее согласование с полем смещений на спутник достигается при углах падения трещины от  $45$  до  $60^\circ$  (рис. 3). Во всех моделях сбросовая компонента смещений составляет первые сантиметры, т.е. в пределах точности равна нулю. Расширение при угле падения  $45^\circ$  составляет 82 см, при  $60^\circ$  — 71 см, при  $80^\circ$  — 64 см. Следовательно, объем внедрившегося материала составляет  $2.0 \times 10^6$ ,  $1.7 \times 10^6$  и  $1.5 \times 10^6 \text{ м}^3$ , что согласуется с приведенными выше данными других авторов. Модель с одной прямоугольной трещиной хорошо приближа-



**Рис. 3.** Модель трещины в вулканической постройке вулкана Корякский. Смещения в направлении на спутник показаны цветовой шкалой (метры), изолинии – расчетные смещения (метры): (а), (б), (в) – модели с углом падения 45°, 60° и 80°. Красный прямоугольник – проекция трещины на горизонтальную плоскость.

ет реальное поле смещений, поэтому мы сочли нецелесообразным усложнять эту модель.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Смещения поверхности вулкана Корякский, полученные методами РСА интерферометрии, превосходят 25 см и не могут быть объяснены слоем пепловых отложений, сформированным в период извержения 2008–2009 г. Склоновые процессы и таяние ледника должны были привести к смещениям противоположного знака. Следовательно, наиболее вероятной причиной смещений следует признать внедрение магматического материала в постройку вулкана. На это указывают также данные анализа сейсмических каталогов и тепловизионных исследований.

2. Модель трещины с глубиной нижней кромки 0.5 км над уровнем моря, шириной по простиранию 1.0 км, по падению 2.4 км, с углом падения от 45 до 60° хорошо соответствует смещениям, определенным по РСА интерферометрии. Объем трещины согласуется с другими оценками [Гордеев, Дрознин, 2010; Кирюхин и др., 2017]. Заметим, что глубина трещины может быть увеличена на 1 км при соответствующем уменьшении ее геометрических размеров.

3. Полученные результаты поддерживают гипотезу о том, что активизация вулкана Корякский была связана с подъемом вулканического материала и его внедрением, в том числе, в вулканическую постройку самого вулкана. Поэтому происходящие под вулканом процессы могут создавать опасность для расположенных в его окрестности населенных пунктов и объектов инфраструктуры и требуют непрерывного мониторинга.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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”.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Японское космическое агентство JAXA за снимки спутника АЛОС, предоставленные в рамках проекта ER2A2N075.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аникин Л.П., Вергасова Л.П., Максимов А.П., Овсянников А.А., Чубаров В.М. Пеплы извержения Корякского вулкана в 2009 г. Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы региональной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский (30 марта–1 апреля 2011 г.). 2011. С. 10–14.
- Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуждаев А.А., Ушаков С.В., Коновалова О.А. Активность вулкана Корякский с октября 2008 г. по октябрь 2009 г. по данным KVERT. Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский (30–31 марта 2009 г.) 2010. С. 15–23.
- Гордеев Е.И., Дрознин В.А. Температура эксплозивного шлейфа извержения вулкана Корякский в 2009 г. // Докл. РАН. 2010. Т. 430. № 3. С. 349–351.
- Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Исаев Ю.С., Киселева Е.А., Михайлов В.О., Смольянинова Е.И. Некоторые проблемы обработки и интерпретации данных спутниковой радарной интерферометрии на примере мониторинга оползневых процессов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 130–142.
- Иванов В.В. Активизация вулкана Корякский (Камчатка) в конце 2008–начале 2009 гг.: оценки выноса тепла и водного флюида, концептуальная модель подъема магмы и прогноз развития активизации. Материалы конференции, посвященной Дню вулканоло-

га. Петропавловск-Камчатский (30–31 марта 2009 г.). 2010. С. 24–38.

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.

Максимов А.П., Аникин Л.П., Вергасова Л.П., Овсянников А.А., Чубаров В.М. Пеплы извержения Корякского вулкана (Камчатка) в 2009 г.: особенности состава и генезис // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2011. № 2. С. 73–86.

Михайлов В.О., Киселева Е.А., Смольянинова Е.И., Дмитриев П.Н., Голубева Ю.А., Исаев Ю.С., Дорохин К.А., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А., Голубев В.И. Мониторинг оползневых процессов на участке Северокавказской железной дороги с использованием спутниковой радарной интерферометрии в различных диапазонах длин волн и уголкового отражателя // Геофизические исследования. 2013. Т. 14. № 4. С. 5–22.

Armigliato A., Tinti S. Influence of topography on coseismic displacements induced by the Friuli 1976 and the Irpinia 1980 earthquakes (Italy) analyzed through a two-dimensional hybrid model // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № B12. P. 2552.

<https://doi.org/10.1029/2002JB002027>

Bushenkova N., Koulakov I., Senyukov S., Gordeev E.I., Huang H.-H., El Khrepy S., Al Arifi N. Tomographic images of magma chambers beneath the Avacha and Koryaksky volcanoes in Kamchatka // J. Geophysical Research: Solid Earth. 2019. V. 124. P. 9694–9713.

Koulakov I., Jaxybulatov K., Shapiro N.M., Abkadyrov I., Deev E., Jakovlev A., Kuznetsov P., Gordeev E., Chebrov V. Asymmetric caldera-related structures in the area of the Avacha group of volcanoes in Kamchatka as revealed by ambient noise tomography and deep seismic sounding // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2014. V. 285. P. 36–46.

Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bulletin of the seismological society of America. 1985. V. 75. № 4. P. 1135–1154.

## On the Connection between the Activation of the Koryakskii Volcano in 2008–2009 and Deep Magmatic Processes

V. O. Mikhailov<sup>a,b,\*</sup>, M. S. Volkova<sup>a</sup>, E. P. Timoshkina<sup>a</sup>,  
N. M. Shapiro<sup>a,c</sup>, V. B. Smirnov<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

<sup>b</sup>*Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

<sup>c</sup>*Institut des Sciences de la Terre, Université Grenoble Alpes, CNRS (UMR5275), Grenoble, 38400 France*

\*e-mail: [mikh@ifz.ru](mailto:mikh@ifz.ru)

The last activation of the Koryakskii volcano in 2008–2009 was accompanied by intense fumarolic and seismic activity. Volcanic activity peaked in March–April 2009 when the ash plume rose up to a height of 5.5 km and extended over more than 600 km. For understanding the dynamics of volcanic processes and forecasting the further developments of the events, it is relevant to establish whether the eruption was associated with the rise of magma to beneath the volcanic edifice or caused by fracturing of the volcano's basement and ground-water penetration into the high temperature zone. The analysis of the ALOS-1 satellite images (Japan) using the methods of satellite radar interferometry for the first time determined the displacements of the slopes of the Koryakskii volcano during its last activation. The displacements reach 25 cm and cannot be explained by the deposition of the ash layer or by the slope processes. The most likely cause of the displacements is the intrusion of magmatic material into the volcano edifice with the formation of a fracture with its lower edge at a depth of 0.5 km above sea level, with a size of 1.0 and 2.4 km along the strike and along the dip, respectively, and with a dip angle from 45° to 60°. Therefore, the processes taking place beneath the volcano can be threatening to the nearby localities and infrastructure and require continuous monitoring.

**Keywords:** Koryakskii volcano, 2008–2009 eruption, satellite radar interferometry, slope displacements, dike intrusion