

Районирование Толбачинского дола на основе значений интерферометрической когерентности радиолокационных сигналов

П. Г. Михайлюкова¹, А. И. Захаров², Л. Н. Захарова²

¹ *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия
E-mail: p.mikhaylyukova@geogr.msu.ru*

² *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, Фрязино, 141190, Московская обл., Россия
E-mail: aizakhar@mail.ru*

В работе представлены результаты районирования Толбачинского дола (Камчатка, Россия) на основе значений интерферометрической когерентности. Толбачинский дол относится к вулканически активным районам России. Последнее извержение, которое не было спрогнозировано заблаговременно, произошло в 2012–2013 гг. Поскольку лавовый поток — наиболее сильно отражающий радиолокационный сигнал объект в вулканическом районе, он представляет собой основу для мониторинга деформации вулканической постройки. Для выявления таких стабильных зон использовались значения когерентности, рассчитываемые в ходе интерферометрической обработки радиолокационных данных. В качестве исходных данных использовалась информация, полученная радиолокаторами С-диапазона (Sentinel-1, Radarsat-2) и L-диапазона (ALOS-2) в течение периода 2013–2016 гг. Было сформировано по три интерферометрические пары на разные сезоны по снимкам, полученным каждым радиолокатором. Значения интерферометрической когерентности вычислялись в программных пакетах Sarproz и Sarscare. На основе полученных значений когерентности были построены интегральные карты, характеризующие Толбачинский дол с точки зрения сезонной стабильности отражательных свойств лавовых покровов. Установлено, что самые стабильные объекты дола — лавы двух последних извержений (1975–1976 и 2012–2013 гг.). Для них практически в любое время года характерны максимальные значения когерентности ($>0,8$). Лавы I и II этапов вулканизма имеют гораздо более низкие значения когерентности: 0,3–0,4 по данным радиолокатора С-диапазона и около 0,6 по данным радиолокатора L-диапазона.

Ключевые слова: Толбачинский дол, лавовые покровы, интерферометрия, когерентность

Одобрена к печати: 26.02.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-85-98

Введение

Интерферометрические методы широко используются в изучении вулканических областей для мониторинга деформаций вулканических построек. Для анализа привлекают как амплитудную, так и фазовую составляющую отражённого радиолокационного сигнала. Для вулканических построек вариация в амплитудных значениях зависит, прежде всего, от шероховатости, диэлектрических свойств и уклонов рельефа поверхности. Изменение этих параметров может быть проявлением вулканической активности, включая распространение новых отложений или разрушение существующих форм рельефа (Carn, 1999; Gaddis et al., 1989; Pallister et al., 2013; Pinel et al., 2014; Wadge et al., 2011).

Когерентность же, рассчитываемая на основе фазовой составляющей сигнала, характеризует согласованность пришедших к радиолокатору в разное время сигналов от одного и того же объекта (Захаров и др., 2012). Низкие значения когерентности обычно характеризуют сильные изменения в характеристиках поверхности объектов вулканических районов: появление новых отложений (пирокластических потоков, лахаров, лав), эрозионное разрушение поверхности вулканических форм рельефа или их сильные деформации за время между съёмками интерферометрической пары снимков.

Немалое количество работ посвящено исследованию вулканов на основе анализа значений когерентности (Dietterich et al., 2012; McAlpin, Meyer, 2013; Poland, 2014; Rowland et al., 2003; Smets et al., 2010; Stevens et al., 2001). Зачастую используются методы визуального дешифрирования, анализ значений когерентности (включая многовременную динамику — coherence change detection, CCD) (Le et al., 2019; Olen et al., 2018). Однако в последнее время стали развиваться методы, основанные на создании синтезированных изображений, одной из компонент которых является когерентность (Wegmuller et al., 2015; Yang et al., 2016).

Исследователи отмечают, что методы когерентного анализа дают существенно новую информацию об объекте исследования. Так, например, в работе (Dietterich et al., 2012) указано, что в сравнении с полевыми материалами данный метод лучше характеризует внутреннюю структуру потоков, например положение лавоводов. В работе (Voccardo et al., 2015) приведены результаты многовременного анализа значений когерентности для мониторинга вулканического извержения. Авторы исследования заключают, что необходимо использовать интерферометрические пары снимков, полученных с разных ракурсов, чтобы уменьшить влияние геометрических искажений. В работе (Jung et al., 2016) приведён пример использования методов CCD для детектирования вулканического пепла.

Постоянный мониторинг состояния вулканического района проводится лишь для нескольких крупных вулканов мира (Cayol, Cornet, 1998; Lundgren et al., 2004; Nahar, Mahmud, 2015). В российской практике мониторинг с использованием интерферометрических методов обработки радиолокационных данных выполнялся лишь в отдельные периоды вулканической активности. За последние 100 лет в Толбачинском доле произошли три крупных извержения, последнее из которых (2012–2013) не удалось заблаговременно спрогнозировать (Гордеев и др., 2013). Удалённость района обуславливает применение дистанционных методов исследования для мониторинга состояния вулканических областей с целью прогнозирования возможного извержения и оценки потенциального ущерба. Пространственная неоднородность тропосферного слоя, а также наличие растительного покрова Толбачинского дола влияют на эффективность применения интерферометрических методов для целей мониторинга. Поэтому важно выявить те участки рассматриваемого района, радиофизические характеристики которых имеют повышенную стабильность в течение года или большей его части.

Данные радиолокаторов С- и L-диапазонов могут дополнять друг друга при мониторинге вулканических построек. Например, при наблюдении в L-диапазоне подстилающей поверхности с развитыми растительными покровами временная декорреляция не столь велика, как в С-диапазоне, что обеспечивает возможность мониторинга района Толбачинского дола на большей площади.

Исследуемая территория

Район исследования — Толбачинский дол — расположен к югу от Ключевской группы вулканов, относящейся к мощным вулканическим центрам мира. Она образовалась в четвертичное время — несколько сот тысяч лет назад. Объём вулканических построек в настоящее время достиг порядка 6500 км^3 . В Ключевскую группу входят три действующих вулкана (Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик), а также несколько потухших, среди которых потенциально действующим считается Ушковский (Большое..., 1984) (рис. 1, см. с. 87).

Толбачинский дол представляет собой лавовую равнину площадью 875 км^2 , образовавшуюся в результате излияний из многочисленных шлаковых конусов, связанных с линейной зоной протяжённостью 70 км. Линейная зона имеет на юге простирание северо-северо-восточное, пересекает Плоский Толбачик и, меняя направление на северо-восточное, протягивается далее на расстояние 18–19 км.

Лавовый покров Толбачинского дола возник в результате наслаивания потоков, связанных с извержениями шлаковых конусов. По мощности вулканических извержений в голоцене Толбачинская зона шлаковых конусов в Курило-Камчатском поясе уступает только Ключевскому вулкану.

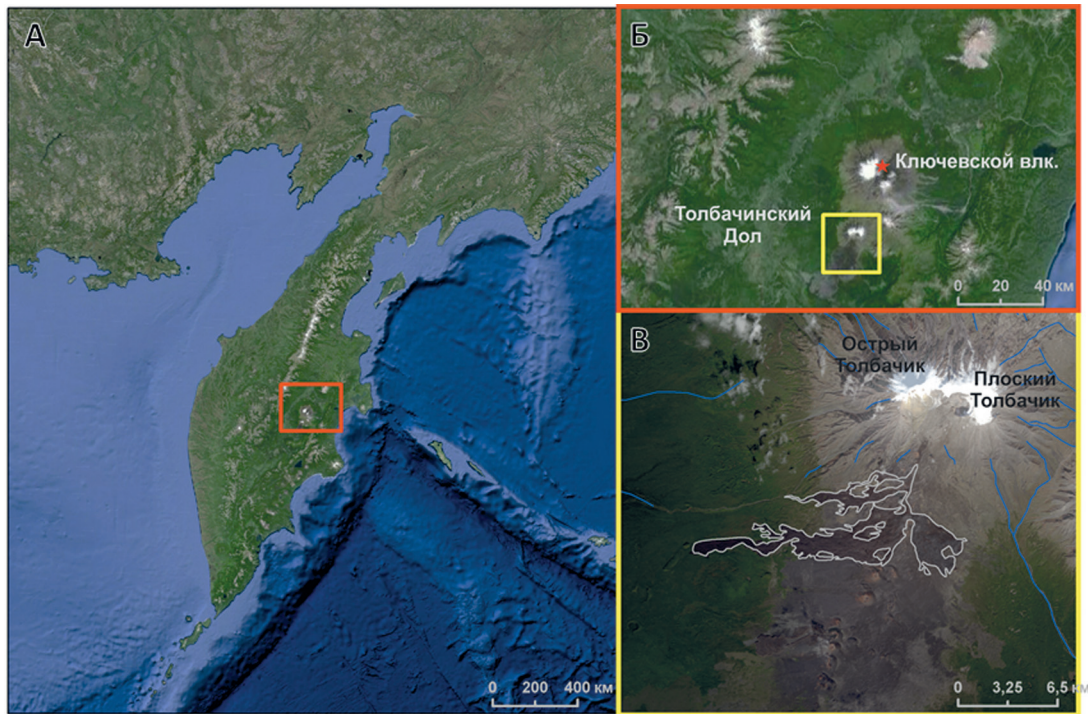


Рис. 1. Положение Ключевской группы вулканов на п-ове Камчатка (а). Положение Толбачинского дола в Ключевской группе вулканов (б). Толбачинский дол (контуром показаны границы лавовых потоков ТТИ-50) (в)

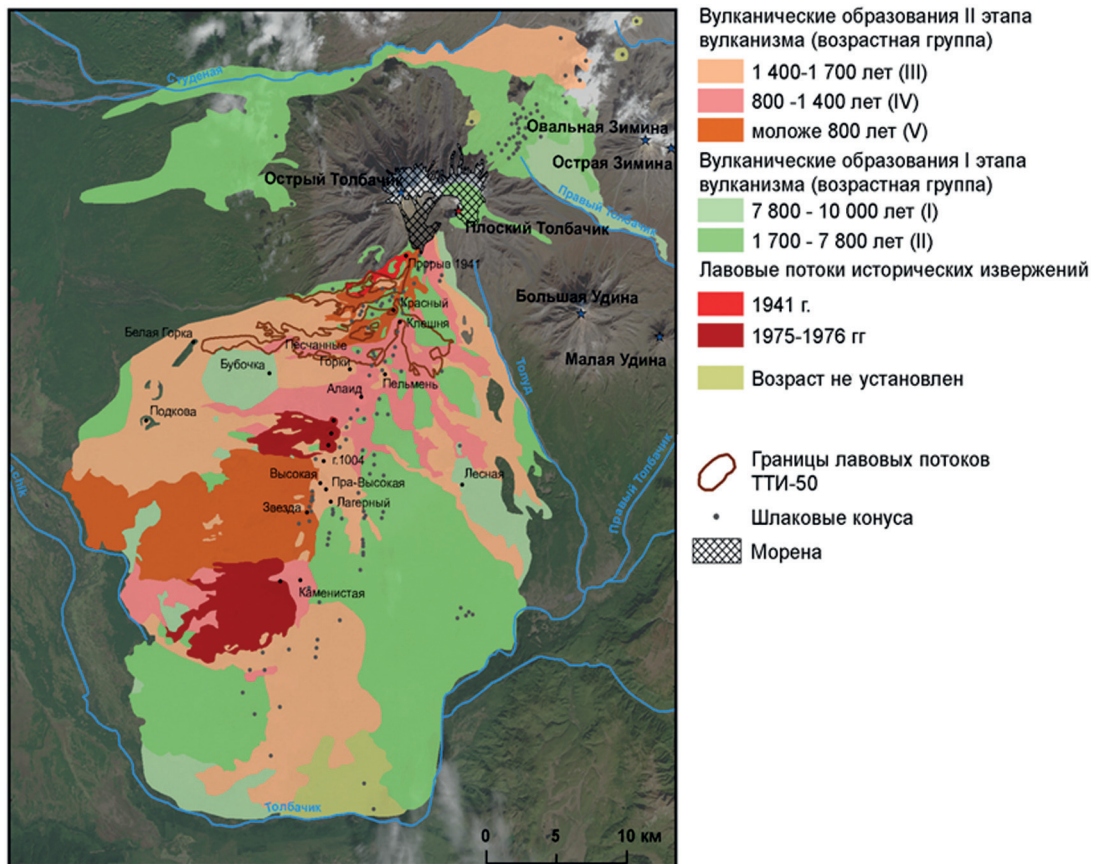


Рис. 2. Вулканические образования Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов (согласно работе (Churikova et al., 2015)); классификация изверженных пород (по книге (Большое..., 1984)). Чёрными прямоугольниками показаны участки, выбранные для статистического анализа

Извержение с объёмом продуктов более 1 км^3 происходит раз в несколько столетий. Последним из таких было Большое Трещинное Толбачинское извержение 1975–1976 гг. (БТТИ) (Большое..., 1984). В 2012–2013 гг. произошло ещё одно крупное извержение, получившее название Трещинное Толбачинское извержение им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТТИ-50). Оно является ярким примером извержения гавайского типа, сопровождающегося мощным фонтанированием лавы, интенсивным излиянием жидких базальтовых потоков и умеренными пелловыми выбросами.

Образовавшиеся в ходе ТТИ-50 три лавовых поля перекрыли поля вулканитов III, IV и V возрастных групп II этапа вулканизма (последние 2000 лет). К северу и к востоку от конуса Клешня лавы ТТИ-50 перекрыли образования I возрастной группы I этапа вулканизма (7500–10000 лет назад) (рис. 2, см. с. 87).

Характеристика лавовых полей разного возраста

Практически безлесная поверхность Толбачинского дола (Гришин, Шляхов, 2009) сложена преимущественно лавами базальтового типа и пирокластическими потоками разных возрастов (Churikova et al., 2015a, b). Эти объекты и определяют облик данной зоны на космических снимках, в том числе и на радиолокационных.

Новообразовавшийся лавовый поток — наиболее сильно отражающий с точки зрения радиолокационного зондирования объект вулканического района. После того как вулканическое извержение заканчивается, на лавовый поток начинают действовать экзогенные факторы рельефообразования (выветривание и т. д.), что приводит к его постепенному разрушению. В образующихся трещинах лавового покрова начинают прорастать растительные сообщества. Такие особенности формирования и развития лавового покрова определяют образ разновозрастных лав на радиолокационных изображениях.

Доля растительных сообществ в лавовом покрове главным образом и определяет динамику значений когерентности в течение бесснежного периода. Если для лав последнего извержения ТТИ-50 характерна поверхность, полностью лишённая растительного покрова (за исключением тех участков, которые были выше уровня формирования лавовых полей) (рис. 3), то уже на лавах предыдущего извержения, БТТИ, случившегося более 40 лет назад, начинает закрепляться простейшая растительность (рис. 4, см. с. 89). На рис. 4 также приведён пример шлакового покрова, покрывающего довольно обширные территории Толбачинского дола (шлак — крупнопористая или пузыристая вулканическая горная порода, образовавшаяся в результате выделения газов при застывании богатой ими жидкой лавы). Шлаковый покров может включать травяную и мохово-лишайниковую растительность. На рис. 5 (см. с. 89) приведена фотография, характеризующая лавовые покровы древних извержений (лавы I и II этапов вулканизма). Для них уже характерно наличие травянистой и кустарниковой растительности. В некоторых случаях также встречается древесная растительность.



Рис. 3. Лавы ТТИ-50: фрагмент лавы типа пахоэ-хое (слева); вид на Толудское лавовое поле извержения ТТИ-50 (справа)



Рис. 4. Лавы Южного прорыва БТТИ-50 (на переднем плане), лавы I этапа вулканизма (вдали) (слева); шлаковые покровы Толбачинского дола (справа)



Рис. 5. Северо-восточная часть Толбачинского дола. Вид на лавы I и II этапа вулканизма. Слева на фотографии — влк. Острый Толбачик, посередине вдали — влк. Овальная Зими́на, справа — влк. Большая Удина

Материалы и методы

Для районирования Толбачинского дола были использованы радиолокационные данные С-диапазона (Radarsat-2, Sentinel-1) и L-диапазона (ALOS-2). В *табл. 1* приведены даты радиолокационной съёмки. Данные Sentinel-1 были выбраны таким образом, чтобы охватить летние и зимние месяцы для сравнения результатов районирования с результатами, полученными по данным Radarsat-2 и ALOS-2 соответственно.

Таблица 1. Используемые в работе пары радиолокационных изображений

Радиолокатор	Даты съёмки
Radarsat-2	01.06.2013–25.06.2013 25.06.2013–19.07.2013 12.08.2013–05.09.2013
ALOS-2	16.06.2015–06.10.2015 06.10.2015–15.12.2015 15.12.2015–23.02.2016
Sentinel-1	12.06.2016–06.07.2016 30.07.2016–23.08.2016 21.12.2016–14.01.2017

Обработка выполнялась в программном обеспечении Sarproz и Sarscape и включала такие стандартные этапы интерферометрической обработки, как импорт данных, поэлементное совмещение изображений, вычисление когерентности и усреднение/фильтрация отсчётов когерентности фильтром Голдстина в окне с эффективным размером 64×64 . Важно отметить, что уровень когерентности отражённых сигналов зависит от ряда факторов, наиболее существенными из которых являются временная декорреляция, пространственная декорреляция и декорреляция из-за тепловых шумов (Денисов и др., 2018). Временная декорреляция возникает вследствие существенного изменения радиофизических свойств и структуры отражающей поверхности за время между съёмками. Пространственная декорреляция возникает вследствие разной геометрии съёмки изображений интерферометрической пары.

Кроме того, технические параметры обработки также влияют на точность расчётов значений когерентности. В работе (Виноградова, Сосновский, 2018) приводится анализ зависимости значений когерентности от размера окна. Установлено, что размер области усреднения не должен быть меньше чем 11×11 . Дальнейший рост размера окна приводит к уменьшению смещения оценки величины когерентности, при этом снижается детальность итогового изображения.

В результате обработки для каждой пары радиолокационной информации (РЛИ) были получены значения когерентности, которые затем использовались при составлении интегральной карты, послужившей основой для районирования Толбачинского дола. Интегральная карта рассчитывалась суммированием всех значений когерентности, полученных по данным каждого используемого в работе радиолокатора. На таких интегральных картах информативными считаются только те области, для которых уровень когерентности превышает некоторый заданный уровень на каждой отдельной карте когерентности. Те области, для которых значения когерентности имеют приемлемый уровень только у одной-двух интерферометрических пар, были исключены из анализа, поскольку низкая когерентность в таких случаях чаще всего связана с сезонным изменением состояния растительности. Далее выделялись интервалы значений когерентности с шагом 0,2, характеризующие разные по стабильности участки поверхности дола.

Был выполнен также статистический анализ значений когерентности для основных возрастных групп лавовых потоков. Для этого в разных частях исследуемых лавовых потоков в пределах полигона (250×250 м) выбирались значения когерентности, после чего выполнялся анализ максимальных, минимальных и средних значений когерентности. На *рис. 2* чёрными прямоугольниками показаны местоположения полигонов.

Для наглядного сопоставления полученных результатов расчёта когерентности с особенностями растительного покрова Толбачинского дола был использован снимок Landsat-8/OLI от 12 сентября 2014 г. для расчёта NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), который характеризует фотосинтетически активную биомассу (Jiang et al., 2006; Lyon et al., 1998; Ormsby et al., 1987).

Результаты

Анализ значений NDVI для Толбачинского дола (*рис. 6*, см. с. 91) показывает, что для лав последних извержений характерны отрицательные значения индекса NDVI ($-0,6 \dots -0,9$), что связано с полным отсутствием растительности, а также особенностями отражения солнечного излучения в разных спектральных каналах. Для лав II возрастной группы, для которых характерно развитие в основном травянистой растительности, значения NDVI меняются в диапазоне $-0,1 \dots 0$. Самые древние лавы — I возрастной группы — имеют максимальные значения NDVI, достигающие $0,5-0,6$.

На *рис. 7* (см. с. 92) приведены примеры карт когерентности, построенных по данным Radasat-2, Sentinel-1 и ALOS-2. Их анализ показывает, что наиболее высокая когерентность характерна для лавовых полей последних извержений — БТТИ и ТТИ-50. Кроме того, на этих полях когерентность высока как в С-, так и в L-диапазоне, что даёт возможность мониторинга мелкомасштабных деформаций поверхности вулканического района

методами радарной интерферометрии. Низкие значения когерентности для большей части Толбачинского дола, покрытой вулканическими образованиями I и II возрастных групп, обусловлены сезонной динамикой, включая изменение фенологических фаз растительности. Данные ALOS-2 пригодны для построения карт когерентности по большей части дола практически в любое время года, кроме тех периодов, когда одно изображение из радиолокационной пары получено при положительной температуре воздуха, другое — при отрицательной. Таким примером является пара 06.10.2015–15.12.2015. В декабре на территории Толбачинского дола температуры воздуха преимущественно отрицательные, в результате чего происходит изменение диэлектрических свойств элементов кроны дерева в морозные периоды. Это приводит к декорреляции радиолокационного сигнала и, как следствие, к низким значениям когерентности для большей части Толбачинского дола. В остальные промежутки временная стабильность отражения сигнала поверхностью дола в L-диапазоне высока, а сезонная динамика низкорослой растительности дола не приводит к заметной декорреляции. Именно этим обуславливаются достаточно высокие значения когерентности по данным ALOS-2 для всей поверхности дола в летний сезон.

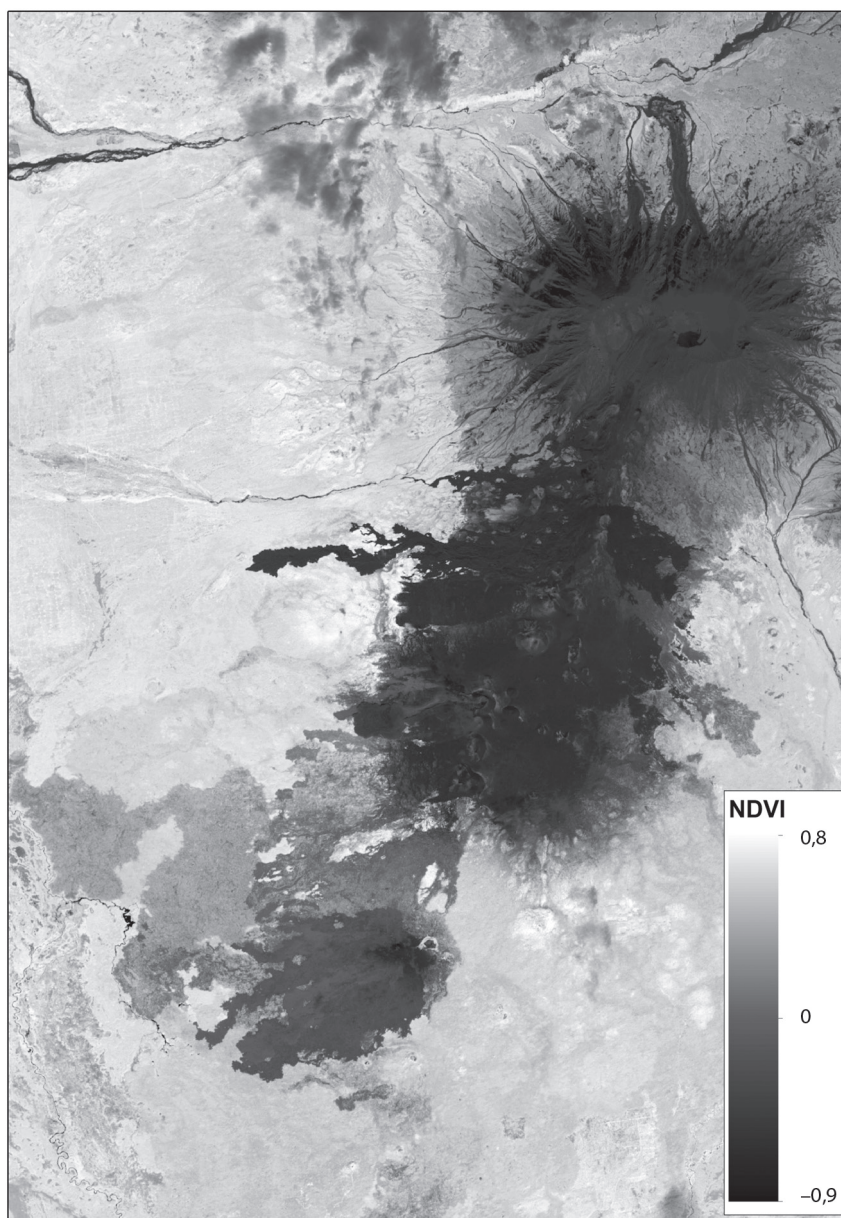


Рис. 6. Значения NDVI, рассчитанные по данным Landsat-8/OLI от 12.09.2014

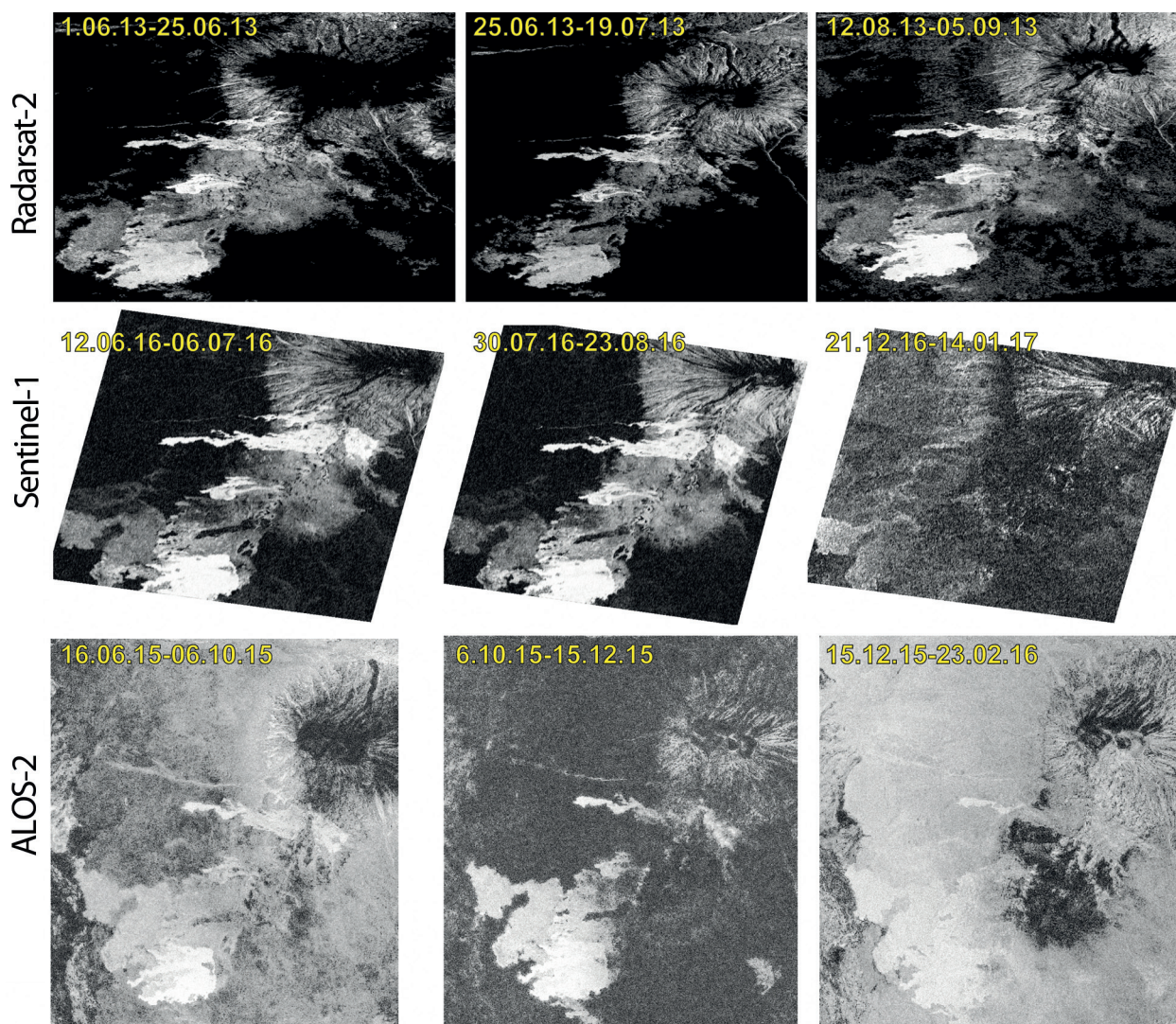


Рис. 7. Рассчитанные значения когерентности

В табл. 2 приведены средние, минимальные и максимальные значения когерентности в пределах ключевых полигонов. Анализ этих данных показывает, что лавы последних извержений (БТТИ и ТТИ-50) имеют самые высокие значения когерентности (больше 0,8) как в С-диапазоне (Sentinel-1 и Radarsat-2), так и в L-диапазоне (ALOS-2). Следует отметить, что в зимний период вследствие частых обильных снегопадов значения когерентности достаточно низки и составляют 0,2 по данным Sentinel-1 и 0,4 по данным ALOS-2. Для лав II этапа вулканизма значения в целом чуть ниже (0,7–0,8) по данным всех рассматриваемых радиолокаторов при их большем разбросе.

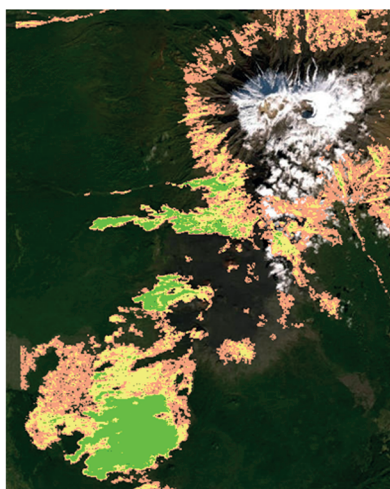
Самые низкие значения когерентности отмечаются у самых старых лав I этапа вулканизма. По данным радиолокаторов С-диапазона значения не превышают 0,5. Значения когерентности, полученные по данным ALOS-2, несколько выше и равны 0,6, за исключением пары 06.10.2015–15.12.2015, когда значение понижается до 0,4. Эти более высокие по сравнению с данными Radarsat-2 и Sentinel-1 значения объясняются более высокой стабильностью отражения сигналов L-диапазона подстилающей поверхностью.

На рис. 8 (см. с. 93) показаны три интегральные карты когерентности, построенные по данным Radarsat-2, Sentinel-1 и ALOS-2. В качестве подложки использован космический снимок Landsat-8/OLI. Те территории, для которых отсутствует цветовой контур, относятся к нестабильным, т. е. к тем, для которых приемлемые уровни когерентности довольно редки. На местности это залесенные участки.

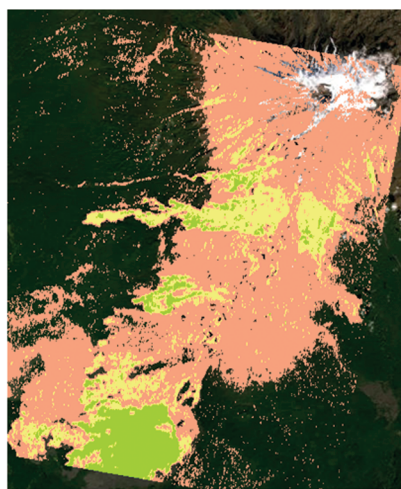
Таблица 2. Значения когерентности для лав разного возраста

Дата	сред.	мин.	макс.	Дата	сред.	мин.	макс.	Дата	сред.	мин.	макс.
Radarsat-2			Sentinel-1				ALOS-2				
Лавы ТТИ-50											
01.06.2013– 25.06.2013	0,8	0,7	0,9	12.06.2016– 06.07.2016	0,9	0,4	0,9	16.06.2015– 06.10.2015	0,7	0,4	0,9
25.06.2013– 19.07.2013	0,85	0,6	0,9	30.07.2016– 23.08.2016	0,9	0,5	0,9	06.10.2015– 15.12.2015	0,8	0,6	0,9
12.08.2013– 05.09.2013	0,9	0,85	0,95	21.12.2016– 14.01.2017	0,2	0,03	0,4	15.12.2015– 23.02.2016	0,8	0,7	0,9
Лавы БТИ											
01.06.2013– 25.06.2013	0,8	0,6	0,9	12.06.2016– 06.07.2016	0,9	0,9	0,95	16.06.2015– 06.10.2015	0,85	0,7	0,9
25.06.2013– 19.07.2013	0,8	0,6	0,9	30.07.2016– 23.08.2016	0,9	0,9	0,95	06.10.2015– 15.12.2015	0,8	0,5	0,9
12.08.2013– 05.09.2013	0,9	0,9	0,96	21.12.2016– 14.01.2017	0,2	0,01	0,5	15.12.2015– 23.02.2016	0,8	0,6	0,9
II этап вулканизма											
01.06.2013– 25.06.2013	0,7	0,4	0,8	12.06.2016– 06.07.2016	0,8	0,1	0,9	16.06.2015– 06.10.2015	0,7	0,4	0,9
25.06.2013– 19.07.2013	0,7	0,4	0,8	30.07.2016– 23.08.2016	0,8	0,03	0,9	06.10.2015– 15.12.2015	0,75	0,5	0,9
12.08.2013– 05.09.2013	0,7	0,4	0,9	21.12.2016– 14.01.2017	0,3	0,07	0,5	15.12.2015– 23.02.2016	0,8	0,6	0,9
I этап вулканизма											
01.06.2013– 25.06.2013	0,5	0,2	0,7	12.06.2016– 06.07.2016	0,3	0,03	0,5	16.06.2015– 06.10.2015	0,6	0,2	0,8
25.06.2013– 19.07.2013	0,4	0,1	0,6	30.07.2016– 23.08.2016	0,3	0,06	0,5	06.10.2015– 15.12.2015	0,4	0,01	0,7
12.08.2013– 05.09.2013	0,5	0,3	0,8	21.12.2016– 14.01.2017	0,1	0,01	0,3	15.12.2015– 23.02.2016	0,6	0,01	0,8

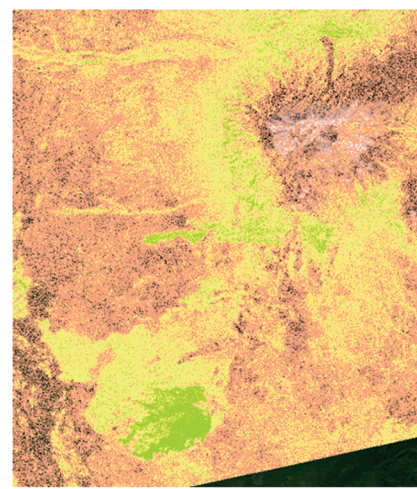
Radarsat-2



Sentinel-1



ALOS-2



■ Значения когерентности >0,8 в течение года
 ■ Значения когерентности <0,6 в течение года
■ Значения когерентности 0,6–0,8 в течение года

Рис. 8. Интегральные карты когерентности Толбачинского дола

На картах выделены три градации когерентности: больше 0,8; 0,6–0,8; меньше 0,6. Районы со значениями, превышающими 0,8, являются наиболее стабильными и имеют высокие показатели в течение всех наблюдаемых периодов. К этим районам на всех трёх интегральных картах относятся лавы последних извержений — БТТИ и ТТИ-50. Ко второму интервалу значений когерентности (0,6–0,8) по карте, построенной по данным радиолокатора L-диапазона, относятся лавы преимущественно II этапа вулканизма, для которых характерны сезонные вариации когерентности, обусловленные растительностью. По данным C-диапазона такой взаимосвязи не наблюдается — во второй интервал попадают как участки лав последних извержений, так и частично лавы II возрастной группы. В третий интервал (менее 0,6) на всех изображениях попадают лавы преимущественно I возрастной категории.

Карты когерентности, полученные по данным радиолокаторов C-диапазона, предположительно, также позволяют дешифровать и уточнить положение границ лав разного возраста (рис. 9). Текущие границы лав разного возраста выделены на основе результатов полевых наблюдений, а также материалов аэрофотосъёмки, выполненных в советское время. Полевые обследования носили дискретный характер и не предоставляли заверочной информации о лавовом покрове всего дола. Для подтверждения возможности уточнения границ по картам когерентности для Толбачинского дола необходимо выполнить полевые работы.

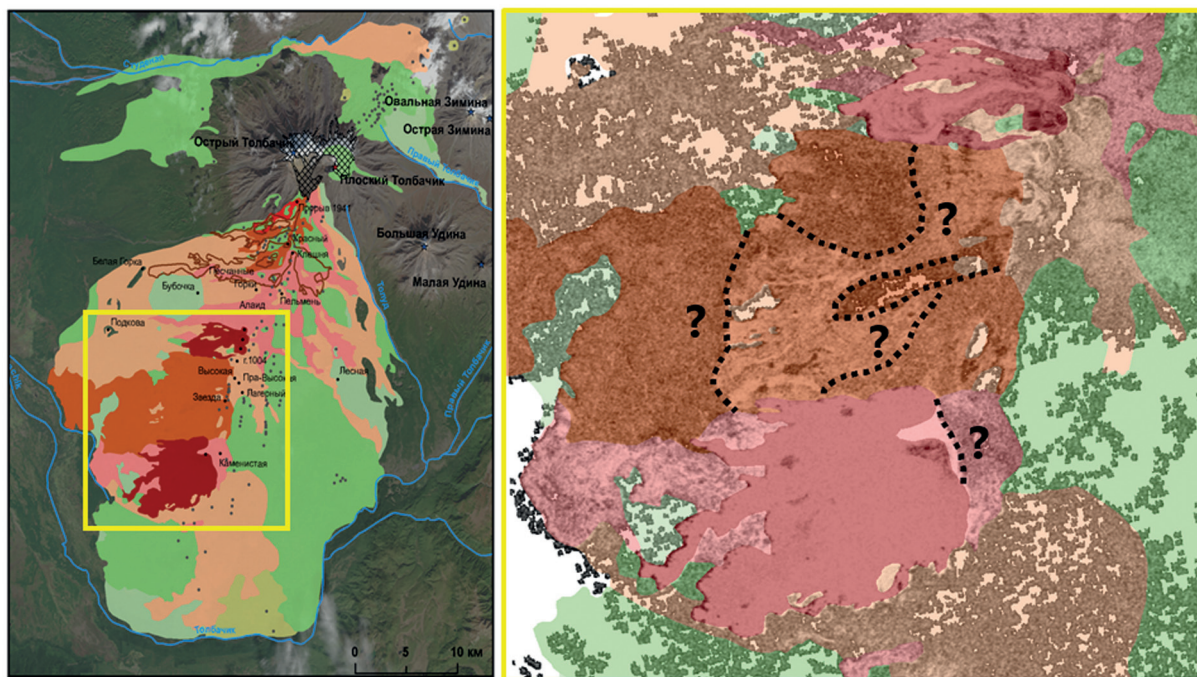


Рис. 9. Возможность уточнения границ лав разного возраста по карте когерентности по данным Radarsat-2 (пара 12.08.2013–05.09.2013)

На рис. 9 приведена карта лавовых покровов Толбачинского дола, а также увеличенный фрагмент, включающий полупрозрачный слой с лавовыми отложениями разного возраста и карту когерентности. Анализируя выбранный фрагмент, заметим, что общие контуры лав на карте лавовых покровов и карта когерентности совпадают (хорошо заметно на потоках, образовавшихся во время БТТИ).

На рис. 10 (см. с. 95) приведён фрагмент карты когерентности, полученной в результате обработки радиолокационной пары 16.06.2015–06.10.2015 аппаратуры ALOS-2. Её анализ в совокупности с анализом значений когерентности лав разного возраста (см. табл. 2) показывает, что границы лав I и II этапа вулканизма практически не дешифрируются на представленной картинке. Это, вероятно, связано с тем, что вариации нестабильности отражательных свойств растительных покровов дола в L-диапазоне не столь существенны в C-диапазоне.

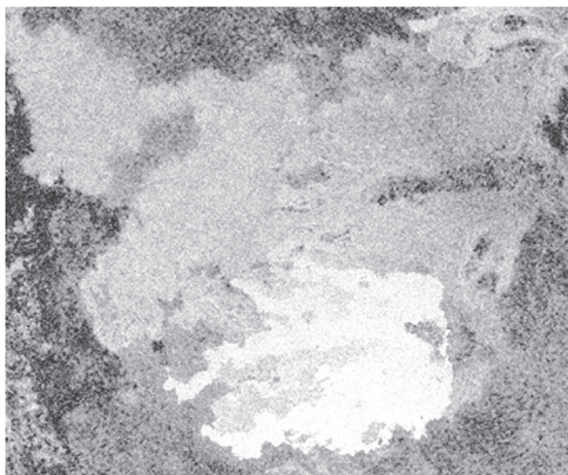


Рис. 10. Фрагмент карты когерентности, полученной по данным ALOS-2, 16.06.2015–06.10.2015

Заключение

В работе показано, что карты интерферометрической когерентности могут являться самостоятельным источником информации о возрасте лав. Проведённый анализ выявил, что лавы последних извержений — БТТИ и ТТИ-50 — имеют самые высокие значения когерентности в Толбачинском доле (больше 0,8) по данным С- и L-диапазонов и, как следствие, хорошо дешифрируются по картам когерентности. Это позволяет использовать такие участки для постоянного мониторинга состояния Толбачинского дола.

Более древние лавы, I и II этапов вулканизма, имеют существенно более низкие значения когерентности по данным С-диапазона, а по данным L-диапазона значения их когерентности близки к показателям, полученным в результате обработки Sentinel-1 и Radarsat-2. Привлечение к анализу индекса NDVI подтвердило предположение, что различия в значениях когерентности лав разного возраста связано главным образом с различием растительного покрова.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-07-00816).

Литература

1. Большое трещинное Толбачинское извержение (1975–1976 гг., Камчатка). М.: Наука, 1984. 637 с.
2. *Виноградова Н. С., Сосновский А. В.* Использование карт когерентности для повышения точности интерферограмм при обработке данных радиолокаторов с синтезированной апертурой // *Ural Radio Engineering J.* 2018. Т. 2. № 1. С. 67–80.
3. *Гордеев Е. И., Муравьев Я. Д., Самойленко С. Б., Волинец А. О., Мельников Д. В., Двигало В. Н.* Трещинное Толбачинское извержение в 2012–2013 гг. Первые результаты // *Докл. Акад. наук.* 2013. Т. 452. № 5. С. 562–566.
4. *Денисов П. В., Захаров А. И., Мартыанов А. С., Трошко К. А.* Исследование интерферометрической когерентности в зависимости от интервала между радарными съемками на примере данных X-диапазона // *Материалы 2-й Всероссийской науч. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн».* Муром, 2018. 2018. С. 246–251.
5. *Захаров А. И., Яковлев О. И., Смирнов В. М.* Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. М.: Изд-во «Красанд», 2012. 248 с.
6. *Voccardo P., Gentile V., Tonolo F. G., Grandoni D., Vassileva M.* Multitemporal SAR coherence analysis: lava flow monitoring case study // *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS): Proc.* 2015. P. 2699–2702.

7. *Carn S.A.* Application of synthetic aperture radar (SAR) imagery to volcano mapping in the humid tropics: a case study in East Java, Indonesia // *Bull. Volcanology*. 1999. No. 61. P. 92–105.
8. *Cayol V., Cornet Fr. H.* Effects of topography on the interpretation of the deformation field of prominent volcanoes—Application to Etna // *Geophysical Research Letters*. 1998. V. 25. No. 11. P. 1979–1982.
9. *Churikova T. G., Gordeychik B. N., Edwards B. R., Ponomareva V. V., Zelenin E. A.* (2015a) The Tolbachik volcanic massif: A review of the petrology, volcanology and eruption history prior to the 2012–2013 eruption // *J. Volcanology and Geothermal Research*. 2015. V. 307. P. 3–21.
10. *Churikova T. G., Gordeychik B. N., Iwamori H., Nakamura H., Ishizuka O., Nishizawa T., Haraguchi S., Miyazaki T., Vaglarov B. S.* (2015b) Petrological and geochemical evolution of the Tolbachik volcanic massif, Kamchatka, Russia // *J. Volcanology and Geothermal Research*. 2015. V. 307. P. 156–181.
11. *Dietterich H. R., Poland M. P., Schmidt D. A., Cashman K. V., Sherrod D. R., Espinosa A. T.* Tracking lava flow emplacement on the east rift zone of Kilauea, Hawai'i, with synthetic aperture radar coherence // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2012. V. 13. No. 5. P. 1–17.
12. *Gaddis L., Mougini-Mark P., Singer R., Kaupp V.* Geologic analyses of Shuttle Imaging Radar (SIR-B) data of Kilauea Volcano, Hawaii // *Geological Soc. America Bull.* 1989. V. 101. P. 317–332.
13. *Jiang Z., Huete A. R., Chen J., Chen Y., Li J., Yan G., Zhang X.* Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction // *Remote Sensing of Environment*. 2006. V. 101. No. 3. P. 366–378.
14. *Lundgren P., Casu F., Manzo M., Pepe A., Bernardino P., Sansosti E., Lanari R.* Gravity and magma induced spreading of Mount Etna volcano revealed by satellite radar interferometry // *Geophysical Research Letters*. 2004. V. 31. P. 4.
15. *Lyon J. G., Yuan D., Lunetta R. S., Elvidge C. H.* A change detection experiment using vegetation indices // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1998. V. 64. No. 2. P. 143–150.
16. *McAlpin D., Meyer F. J.* Multi-sensor data fusion for remote sensing of post-eruptive deformation and depositional features at Redoubt Volcano // *J. Volcanology and Geothermal Research*. 2013. V. 259. P. 441–423.
17. *Nahar S. S., Mahmud A.* SAR Observation for the Surface Displacements at Mt. Etna between 2003 and 2007 // *Intern. J. Geosciences*. 2015. V. 6. P. 159–171.
18. *Ormsby J. P., Choudhury B. J., Owe M.* Vegetation spatial variability and its effect on vegetation indices // *Intern. J. Remote Sensing*. 1987. V. 8. No. 9. P. 1301–1306.
19. *Pallister J. S., Schneider D. J., Griswold J. P., Keeler R. H., Burton W. C., Noyles Ch., Newhall Ch. G., Ratdomopurbo A.* Merapi 2010 eruption — Chronology and extrusion rates monitored with satellite radar and used in eruption forecasting // *J. Volcanology and Geothermal Research*. 2013. V. 261. P. 144–152.
20. *Pinel V., Poland M. P., Hooper A.* Volcanology: Lessons learned from Synthetic Aperture Radar imagery // *J. Volcanology and Geothermal Research*. 2014. V. 289. P. 81–113.
21. *Poland M. P.* Time-averaged discharge rate of subaerial lava at Kilauea Volcano, Hawai'i, measured from TanDEM-X Interferometry: Implications for magma supply and storage during 2011–2013 // *J. Geophysical Research. Solid Earth*. 2014. V. 119. P. 5464–5481.
22. *Rowland S. K., Harris A. J. L., Wooster M. J., Amelung F., Garbeil H., Wilson L., Mougini-Mark J. P.* Volumetric characteristics of lava flows from interferometric radar and multispectral satellite data: the 1995 Fernandina and 1998 Cerro Azul eruptions in the western Galpagos // *Bull. Volcanology*. 2003. V. 65. P. 311–330.
23. *Smets B., Christelle W., d'Oreye N.* A new map of the lava flow field of Nyamulagira (D. R. Congo) from satellite imagery // *J. African Earth Sciences*. 2010. V. 58. P. 778–786.
24. *Stevens N. F., Wadge G., Williams C. A., Morley J. G., Muller J.-P., Murray J. B., Upton M.* Surface movements of emplaced lava flows measured by synthetic aperture radar interferometry // *J. Geophysical Research. Solid Earth*. 2001. V. 106. No. B6. P. 11293–11313.
25. *Wadge G., Cole P., Stinton A., Komorowski J.-C., Stewart R., Toombs A. C., Legendre Y.* Rapid topographic change measured by high-resolution satellite radar at Soufriere Hills Volcano, Montserrat, 2008–2010 // *J. Volcanology and Geothermal Research*. 2011. V. 199. P. 142–152.
26. *Wegmuller U., Santoro M., Werner C., Cartus O.* On the estimation and interpretation of Sentinel-1 TOPS InSAR coherence // *Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop*. 2015. P. 89–93.
27. *Yang X., Tu S., Bai Y., Yang W.* Fusion of intensity/coherent information using region covariance features for unsupervised classification of SAR imagery // *Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS): Proc.* 2016. P. 941–944.

Zoning of the Tolbachinsky Dol based on InSAR coherence

P. G. Mikhaylyukova¹, A. I. Zakharov², L. N. Zakharova²

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*
E-mail: p.mikhaylyukova@geogr.msu.ru

² *Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch*
Fryazino 141190, Moscow Region, Russia
E-mail: aizakhar@mail.ru

The paper represents the results of geographic demarcation of Tolbachinsky Dol area (Kamchatka, Russia) based on interferometric coherence. Tolbachinsky Dol is a volcanically active region. The last eruption occurred in 2012–2013 and had not been predicted in advance. The formed lava flow is the most strongly scattering object in the volcanic area and could be used as the basis for monitoring the deformations of the volcanic structures. To identify stable zones the coherence values were calculated during interferometric processing of radar data. The data obtained by the C-band images (Sentinel-1, Radarsat-2) and L-band images (ALOS-2) during the period 2013–2016 were used as basic dataset. For each instrument, three interferometric pairs were formed using images acquired in different seasons of the year. Coherence values were calculated using Sarproz and Sarscape software. Based on the coherence values the integral maps were produced to characterize seasonal stability of lava covers of the Tolbachinsky Dol. We have established that the most stable objects of the valley are the lava of the last two eruptions (1975–1976 and 2012–2013). These objects are characterized by maximum coherence values (>0.8) at almost any time of the year. Lavas of stage I and II of volcanism have much lower coherence values: 0.3–0.4 according to the C-band radar images and about 0.6 according to the L-band radar images.

Keywords: Tolbachinsky Dol, lava fields, InSAR, coherence

Accepted: 26.02.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-85-98

References

1. *Bol'shoe treshchinnoe Tolbachinskoe izverzhenie (1975–1976 gg., Kamchatka)* (The Grand Tolbachik Fissure Eruption (1975–1976, Kamchatka)), Moscow: Nauka, 1984, 637 p.
2. Vinogradova N. S., Sosnovskii A. V., Ispol'zovanie kart kogerentnosti dlya povysheniya tochnosti interferogramm pri obrabotke dannykh radiolokatorov s sintezirovannoi aperturoi (Using coherence maps to improve the accuracy of interferograms when processing data from synthetic aperture radars), *Ural Radio Engineering J.*, 2018, Vol. 2, No. 1.
3. Gordeev E. I., Murav'ev Ya. D., Samoilenko S. B., Volynets A. O., Melnikov D. V., Dvigalo V. N., Treshchinnoe Tolbachinskoe izverzhenie v 2012–2013 gg. Pervye rezul'taty (The Tolbachik fissure eruption in 2012–2013. First results), *Doklady Akademii Nauk*, 2013, Vol. 452, No. 5, pp. 562–566.
4. Denisov P. V., Zakharov A. I., Mart'yanov A. S., Troshko K. A., Issledovanie interferometricheskoi kogerentnosti v zavisimosti ot intervala mezhduradarnymi s'emkami na primere dannykh Kh-diapazona (Investigation of interferometric coherence depending on the interval between radar surveys on the example of X band data), *Materialy 2ⁱ Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya, radiolokatsii, rasprostraneniya i difraktsii voln"* (Proc. 2nd All-Russia Conf. "Modern Problems of Remote Sensing, Radar, Waves Propagation and Diffraction"), Murom, 2018, 2018, pp. 246–251.
5. Zakharov A. I., Yakovlev O. I., Smirnov V. M., *Sputnikovyi monitoring Zemli: Radiolokatsionnoe zondirovanie poverkhnosti* (Satellite monitoring of the Earth: Radar probing of the surface), Moscow: Izd. Krasand, 2012, 248 p.
6. Boccardo P., Gentile V., Tonolo F. G., Grandoni D., Vassileva M., Multitemporal SAR coherence analysis: lava flow monitoring case study, *Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2015, pp. 2699–2702.
7. Carn S. A., Application of synthetic aperture radar (SAR) imagery to volcano mapping in the humid tropics: a case study in East Java, Indonesia, *Bull. Volcanology*, 1999, No. 61, pp. 92–105.
8. Cayol V., Cornet Fr. H., Effects of topography on the interpretation of the deformation field of prominent volcanoes—Application to Etna, *Geophysical Research Letters*, 1998, Vol. 25, No. 11, pp. 1979–1982.

9. Churikova T. G., Gordeychik B. N., Edwards B. R., Ponomareva V. V., Zelenin E. A. (2015a), The Tolbachik volcanic massif: A review of the petrology, volcanology and eruption history prior to the 2012–2013 eruption, *J. Volcanology and Geothermal Research*, 2015, Vol. 307, pp. 3–21.
10. Churikova T. G., Gordeychik B. N., Iwamori H., Nakamura H., Ishizuka O., Nishizawa T., Haraguchi S., Miyazaki T., Vaglarov B. S. (2015b), Petrological and geochemical evolution of the Tolbachik volcanic massif, Kamchatka, Russia, *J. Volcanology and Geothermal Research*, 2015, Vol. 307, pp. 156–181.
11. Dietterich H. R., Poland M. P., Schmidt D. A., Cashman K. V., Sherrod D. R., Espinosa A. T., Tracking lava flow emplacement on the east rift zone of Kilauea, Hawai'i, with synthetic aperture radar coherence, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2012, Vol. 13, No. 5, pp. 1–17.
12. Gaddis L., Mougini-Mark P., Singer R., Kaupp V., Geologic analyses of Shuttle Imaging Radar (SIR-B) data of Kilauea Volcano, Hawaii, *Geological Soc. America Bull.*, 1989, Vol. 101, pp. 317–332.
13. Jiang Z., Huete A. R., Chen J., Chen Y., Li J., Yan G., Zhang X., Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 101, No. 3, pp. 366–378.
14. Lundgren P., Casu F., Manzo M., Pepe A., Berardino P., Sansosti E., Lanari R., Gravity and magma induced spreading of Mount Etna volcano revealed by satellite radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, 2004, Vol. 31, p. 4.
15. Lyon J. G., Yuan D., Lunetta R. S., Elvidge C. H., A change detection experiment using vegetation indices, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1998, Vol. 64, No. 2, pp. 143–150
16. McAlpin D., Meyer F. J., Multi-sensor data fusion for remote sensing of post-eruptive deformation and depositional features at Redoubt Volcano, *J. Volcanology and Geothermal Research*, 2013, Vol. 259, pp. 441–423.
17. Nahar S. S., Mahmud A., SAR Observation for the Surface Displacements at Mt. Etna between 2003 and 2007, *Intern. J. Geosciences*, 2015, Vol. 6, pp. 159–171.
18. Ormsby J. P., Choudhury B. J., Owe M., Vegetation spatial variability and its effect on vegetation indices, *Intern. J. Remote Sensing*, 1987, Vol. 8, No. 9, pp. 1301–1306.
19. Pallister J. S., Schneider D. J., Griswold J. P., Keeler R. H., Burton W. C., Noyles Ch., Newhall Ch. G., Ratdomopurbo A., Merapi 2010 eruption — Chronology and extrusion rates monitored with satellite radar and used in eruption forecasting, *J. Volcanology and Geothermal Research*, 2013, Vol. 261, pp. 144–152.
20. Pinel V., Poland M. P., Hooper A., Volcanology: Lessons learned from Synthetic Aperture Radar imagery, *J. Volcanology and Geothermal Research*, 2014, Vol. 289, pp. 81–113.
21. Poland M. P., Time-averaged discharge rate of subaerial lava at Kilauea Volcano, Hawai'i, measured from TanDEM-X Interferometry: Implications for magma supply and storage during 2011–2013, *J. Geophysical Research. Solid Earth*, 2014, Vol. 119, pp. 5464–5481.
22. Rowland S. K., Harris A. J. L., Wooster M. J., Amelung F., Garbeil H., Wilson L., Mougini-Mark J. P., Volumetric characteristics of lava flows from interferometric radar and multispectral satellite data: the 1995 Fernandina and 1998 Cerro Azul eruptions in the western Galpagos, *Bull. Volcanology*, 2003, Vol. 65, pp. 311–330.
23. Smets B., Christelle W., d'Oreye N., A new map of the lava flow field of Nyamulagira (D. R. Congo) from satellite imagery, *J. African Earth Sciences*, 2010, Vol. 58, pp. 778–786.
24. Stevens N. F., Wadge G., Williams C. A., Morley J. G., Muller J.-P., Murray J. B., Upton M., Surface movements of emplaced lava flows measured by synthetic aperture radar interferometry, *J. Geophysical Research. Solid Earth*, 2001, Vol. 106, No. B6, pp. 11293–11313.
25. Wadge G., Cole P., Stinton A., Komorowski J.-C., Stewart R., Toombs A. C., Legendre Y., Rapid topographic change measured by high-resolution satellite radar at Soufriere Hills Volcano, Montserrat, 2008–2010, *J. Volcanology and Geothermal Research*, 2011, Vol. 199, pp. 142–152.
26. Wegmuller U., Santoro M., Werner C., Cartus O., On the estimation and interpretation of Sentinel-1 TOPS InSAR coherence, *Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop*, 2015, pp. 89–93.
27. Yang X., Tu S., Bai Y., Yang W., Fusion of intensity/coherent information using region covariance features for unsupervised classification of SAR imagery, *Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2016, pp. 941–944.