

Опыт применения метода дифференциальной интерферометрии для определения смещений земной поверхности в Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии по данным Sentinel-1A за 2017–2022 годы

В. Ю. Ширшова^{1,2}, Е. А. Балдина^{1,3}, Е. В. Лебедева³

¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия*

E-mail: vshirshova.msu@yandex.ru

² *Научный центр оперативного мониторинга Земли, Москва, 127490, Россия*

E-mail: baldina@geogr.msu.ru

³ *Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия*

E-mail: Ekaterina.lebedeva@gmail.com

Вулканически и сейсмически активные регионы нередко испытывают значительные изменения рельефа как эндогенной, так и экзогенной природы, что делает актуальным мониторинг земной поверхности в таких районах. Обнаружение поднятий и опусканий возможно дистанционно применением метода дифференциальной интерферометрии. Несмотря на то, что метод уже уверенно себя зарекомендовал в решении ряда задач наук о Земле, разработка вопросов его применения на труднодоступных для регулярного мониторинга территориях не теряет актуальности. В настоящей работе мы провели эксперимент по определению смещений в Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии по недавним радиолокационным съёмкам Sentinel-1A, руководствуясь схожим опытом, полученным почти 20 лет назад по данным Radarsat-1. Особое внимание уделено вопросам выбора данных с учётом особенностей местности, параметров съёмки и погодных условий во время её выполнения, которые оказывают влияние на конечный результат. По 25 снимкам было сформировано 260 интерферограмм и столько же изображений когерентности, охватывающих временной интервал с 2017 по 2022 г. Анализ метеорологических данных на моменты съёмки и оценка состояния местности сократили число пригодных для обработки интерферометрических пар до 15. Сформулированные в процессе работы критерии выбора оптимальных условий съёмки этого района для определения многолетних смещений земной поверхности по паре снимков определили выбор одной пары изображений — за 18.08.2017 и 04.08.2022. По результатам обработки этой пары были зафиксированы опускания и поднятия в разных областях изучаемой территории от –15 до +7 см.

Ключевые слова: дифференциальная интерферометрия, Sentinel-1, Камчатка, метеоданные, Узон-Гейзерная вулcano-тектоническая депрессия

Одобрена к печати: 04.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-133-146

Введение

В последние годы мировые космические агентства проявляют всё больший интерес к разработке радиолокационных систем, работающих в интерферометрическом режиме, что обусловлено расширением спектра решаемых задач. Этот факт подтверждается ростом числа активно развивающихся орбитальных группировок, таких как китайские GaoFen-3, Huan Jing и Hebi-2, финские ICEYE, американские Capella и Umbra, а также перспективные российские «Кондор-ФКА» и «Обзор-Р».

Метод дифференциальной интерферометрии успешно применяется для создания крупномасштабных карт деформаций земной поверхности с субсантиметровым разрешением. Деформации могут быть связаны с различными явлениями, такими как: вулканическая активность, сейсмические события, оползни, движение ледников, просадки в местах разработки месторождений и многие другие (Cigna et al., 2012; Goldstein, Werner, 1998; Lanari et al., 2010; Lundgren et al., 2020; Velez et al., 2011).

Дифференциальная интерферометрия основывается на применении фазовой составляющей радиолокационных изображений (РЛИ). Разница фаз сигнала двух съёмков, проведённых в разное время и в разных орбитальных положениях, предоставляет возможность определения изменения высоты поверхности (смещений). Согласованность интерферометрической фазы, необходимая для этого определения, обычно измеряется с использованием безразмерной величины, известной как когерентность. Для повышения временной и пространственной согласованности фаз РЛИ должны быть получены с относительно близких маршрутов, т.е. с небольшой пространственной базовой линией. Карты смещений формируются после компенсации нежелательных фазовых вкладов, обусловленных рельефом, остаточными орбитальными ошибками, атмосферными и ионосферными набегами (Захаров и др., 2012; Hanssen, 2001; Hooper et al., 2007; Rosen et al., 2010).

Эффективным способом изучения динамики деформационных явлений и их временного поведения представляется генерация временных рядов смещений. Количество пар, применимых для дифференциальной интерферометрии, тесно связано с длиной волны сигнала радара с синтезированной апертурой (РСА). Системы РСА работают на разных частотах, и от этого зависит количество когерентных пар. РСА с более низкими частотами (например, L-диапазона) обеспечивают большее число критических перпендикулярных базовых линий. В то время как радары с более высокими частотами (например, C- или X-диапазона) дают увеличение количества интерферометрических пар, пригодных для дифференциальной интерферометрии (Sandwell et al., 2008).

В различных областях применения важную роль при формировании интерферометрических продуктов играют временные базовые показатели (Gupta, 2017; Massom, Lubin, 2006). Большие значения временной базовой линии приводят к потере когерентности из-за временной декорреляции, которая впоследствии представляет собой один из основных источников ошибок при интерферометрической обработке (Bamler, Hartl, 1998; Pepe, Calò, 2017). При этом потеря когерентности может быть вызвана изменениями рельефа местности из-за деформации поверхности, определение которых становится целью исследования. Но кроме того, изменения в состоянии растительного покрова (вегетация, движение листьев из-за ветра), антропогенная деятельность, замерзание и оттаивание грунта (Bamler, Hartl, 1998) также приводят к различию характеристик рассеивания и потере когерентности со временем (Hanssen, 2001; Pepe, Calò, 2017). Несмотря на большое число исследований по применению метода дифференциальной интерферометрии, стремительный рост числа спутников, поддерживающих интерферометрический режим, и предоставляемых видов данных, остаются нерешёнными вопросы выбора оптимальных параметров съёмки и условий её проведения, возникающие в процессе выполнения частных задач, обусловленных физико-географическими особенностями территорий.

Постановка задачи исследования

Метод дифференциальной интерферометрии с использованием данных Radarsat-1 был впервые применён для анализа смещений рельефа в восточной части кальдеры Камчатки на примере Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии (Lundgren, Lu, 2006). Цель нашего исследования — определить наличие или отсутствие смещений на том же участке Узон-Гейзерной депрессии спустя 20 лет по свободно распространяемым данным европейской радиолокационной группировки Sentinel-1 (<https://scihub.copernicus.eu/dhus>). Эта территория вместе с вулканическим массивом Кихпинич является частью Восточно-Камчатского вулканического пояса и входит в состав Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника. Депрессия состоит из двух разновозрастных кальдер (Узон и Гейзерной) и включает в себя два всемирно известных природных объекта: Долину гейзеров и кальдеру Узон, входящих в списки Всемирного природного наследия ЮНЕСКО (Атлас..., 2015). В вулканических и сейсмически активных регионах наблюдаются быстрые и нередко значительные как по площади, так и по масштабам изменения рельефа эндогенной и экзогенной при-

роды, поэтому мониторинг динамики смещений топографической поверхности там весьма важен. Данный район на протяжении многих лет привлекает внимание специалистов: вулканологами и геофизиками рассматриваются вопросы его тектонической активности (Белоусов и др., 1983; Кугаенко, Леонов, 2018; Кугаенко и др., 2015), геологами — особенности функционирования газогидротермальной системы (Kiryukhin et al., 2012), геоморфологами — связь современного распределения участков активизации склоновых процессов со спектром эндогенных процессов (Лебедева и др., 2022). В результате интерферометрической обработки данных Radarsat-1 (Lundgren, Lu, 2006) по паре снимков 2000 и 2003 гг. было зафиксировано поднятие примерно на 0,15 м, которое авторы предположительно связали с пополнением магматической камеры долгоживущего вулканического центра Кихпинич и сопутствующими процессами. Выявленное смещение нашло обоснование в работах вулканологов, построивших глубинную модель Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии и прилегающего к ней вулканического массива Кихпинич, а также установивших согласие геометрии обнаруженных глубинных структур с локальной микросейсмичностью и моделью современного магматического внедрения в верхние горизонты коры, разработанной по упомянутым данным спутниковой интерферометрии (Кугаенко и др., 2010, 2015; Kiryukhin et al., 2012).

Однако в этой же статье (Lundgren, Lu, 2006) отмечается, что обработка данных Radarsat-1 по парам с 1999 по 2000 гг. и с 2003 по 2004 г. деформаций не выявила. При исследовании были рассмотрены различные вариации геометрии съёмки: использовались данные, полученные при разных углах визирования (48, 38, 42°) и базовых линиях (54, 176, 58, 126, 483, 218 и 80 м), однако не упоминается возможный атмосферный вклад и анализ когерентности РЛИ, что могло бы послужить дополнительной верификацией полученных результатов.

Задачи нашего исследования состояли не только в том, чтобы выявить возможные смещения, но и опробовать данные Sentinel-1, а также определить параметры съёмки для обнаружения смещений и оценить влияние метеорологических параметров на когерентность между РЛИ на территории Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии.

Материалы

Материалы для исследования получены с официального сайта Центра обработки данных и наземной станции спутникового слежения в Геофизическом институте Университета Аляски в Фэрбенксе (*англ.* Alaska Satellite Facility, <https://search.asf.alaska.edu>), где доступны архивные данные съёмки с космического аппарата (КА) Sentinel-1B за 2016–2021 гг.

Выбор параметров РЛИ становится первым этапом работы при интерферометрической обработке и напрямую зависит от физико-географических особенностей и состояния местности (Бадак и др., 2021; Ширшова, 2022). Для получения информационного продукта — карты смещений — необходимо формирование корректной интерферограммы, что обеспечивается высокой когерентностью пары РЛИ и отсутствием радиолокационных эффектов: теней и переналожений. Высокую когерентность обеспечивает отсутствие видимых изменений погоды (резкого перепада температур, выпадения осадков) и растительности (Добрынин и др., 2017, 2018; Захаров и др., 2017, 2023). Анализ климатических данных для территории Камчатки позволяет заключить, что наиболее благоприятный сезон — это август–начало сентября. Радиолокационные эффекты могут не проявляться на РЛИ при правильно подобранных углах визирования и направлении съёмки. Для исследуемой территории среди данных, полученных КА Sentinel-1, было доступно четыре геометрии, представленные в *табл. 1* и проиллюстрированные на *рис. 1* (см. с. 136).

Для всех возможных четырёх геометрий съёмки были построены дифференциальные интерферограммы и установлено, что для исследуемой территории оптимальными для определения смещения будут РЛИ с нисходящей орбиты и с углами визирования от 30 до 36°, что позволяет минимизировать явление радиолокационных эффектов в области интереса. Всего с 2017 по 2022 г. было получено 24 РЛИ на летнее время года: конец июля, август, начало сентября (*табл. 2*).

Таблица 1. Параметры съёмок на территорию исследования

Параметр	Геометрия 1	Геометрия 2	Геометрия 3	Геометрия 4
Направление витка	нисходящее	нисходящее	восходящее	восходящее
Поляризация	ВВ+ВГ	ВВ+ВГ	ВВ+ВГ	ВВ+ВГ
Путь	162	60	140	38
Кадр	408	409	176	172

Примечание: ВВ — вертикально-вертикальная, ВГ — вертикально-горизонтальная поляризация.

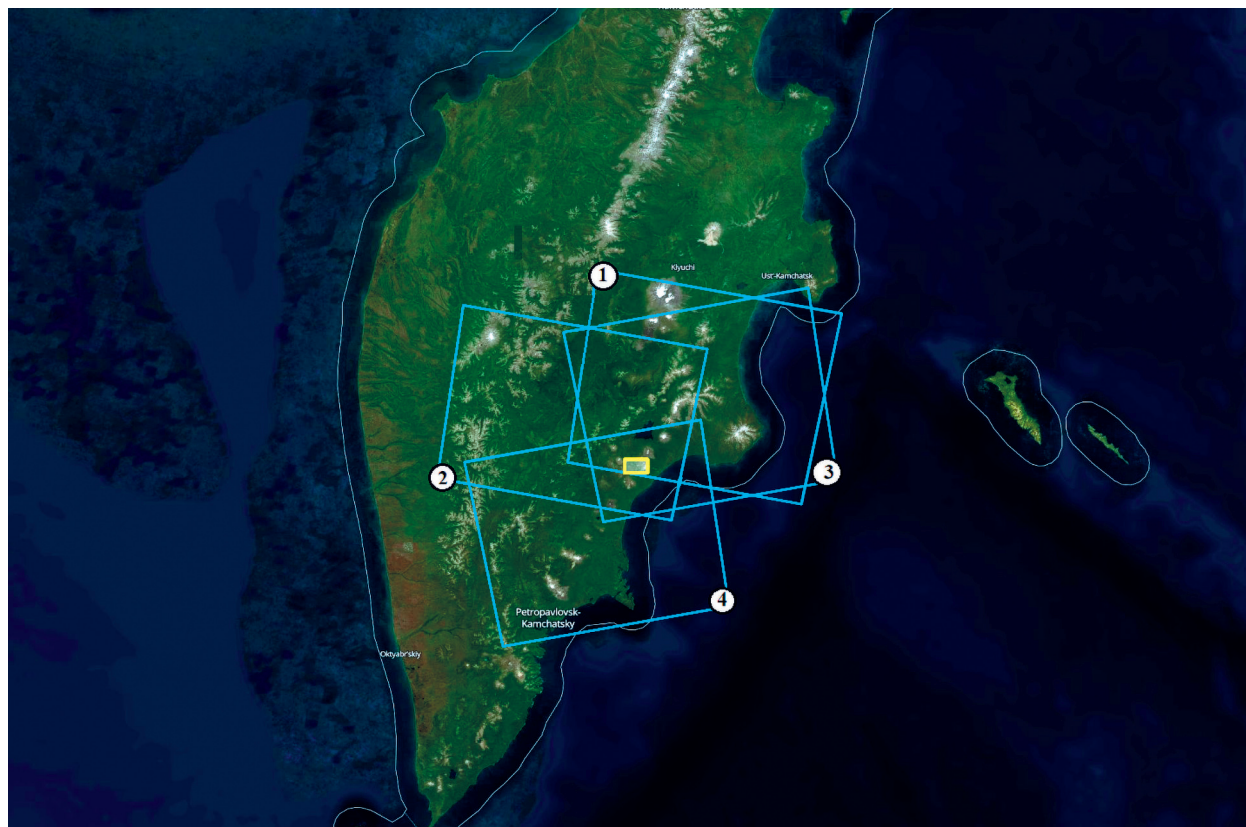


Рис. 1. Снимки Sentinel-1, покрывающие область интереса — жёлтый прямоугольник

Таблица 2. РЛИ Sentinel-1В

2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
06.08.2017	01.08.2018	27.07.2019	02.08.2020	28.07.2021	04.08.2022
18.08.2017	13.08.2018	08.08.2019	14.08.2020	09.08.2021	16.08.2022
30.08.2017	25.08.2018	20.08.2019	26.08.2020	21.08.2021	28.08.2022
11.09.2017	06.09.2018	01.09.2019	07.09.2020	02.09.2021	09.09.2022
	18.09.2018				

Второй этап выбора данных — определение постоянства метеорологических условий в моменты съёмки, исключая даты, в которые наблюдались осадки, поскольку их наличие представляется основным препятствием для получения когерентной пары РЛИ. Так как интервал между съёмками составляет 12 дней, то когерентность может быть низкой из-за ряда

причин: состояния растительности, осадков и перепада температур. Поэтому ввиду физико-географических особенностей исследуемого района контролировались три параметра: количество осадков, температура воздуха, скорость ветра. Источником этой информации послужил метеорологический сайт gp5.ru (<https://gp5.ru/>), где для скачивания доступны архивы по заданному интервалу дат с выбранной метеостанции. Приходится отметить ограниченность погодных данных на район исследования, поскольку подспутниковые метеорологические наблюдения не проводились, а данные с ближайших метеостанций, расположенных в долинах и на побережье, могут не полностью соответствовать состоянию погоды в исследуемом районе в моменты съёмки.

Таблица 3. Метеорологические данные на даты съёмок по метеостанции Мильково

Дата	Температура, °С	Ветер, м/с	Осадки, мм	Дата	Температура, °С	Ветер, м/с	Осадки, мм
06.08.2017	18,6	1	12	02.08.2020	15,3	1	нет
18.08.2017	15,5	1	нет	14.08.2020	11,3	3	0,6
30.08.2017	11,9	3	нет	26.08.2020	7,8	3	14
11.09.2017	9,7	1	2	07.09.2020	10	2	1
01.08.2018	16,1	2	нет	28.07.2021	19,8	2	нет
13.08.2018	15,7	2	нет	09.08.2021	11,7	2	нет
25.08.2018	13,1	2	нет	21.08.2021	19,4	3	нет
06.09.2018	13,1	3	нет	02.09.2021	15	3	6
18.09.2018	10,8	4	5	04.08.2022	14,6	2	нет
27.07.2019	17,7	1	нет	16.08.2022	16,1	5	0,5
08.08.2019	12,9	3	0,8	28.08.2022	12,1	1	3
20.08.2019	13,8	3	0,1	09.09.2022	17,2	6	нет
01.09.2019	13,5	1	нет				

Для выбора РЛИ использовались данные с метеостанции в пос. Мильково, расположенном в долине р. Камчатки на расстоянии около 85–100 км от Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии. Интересующие нас параметры погоды представлены в *табл. 3*, при этом состояние погоды может несколько различаться даже в разных частях самого исследуемого района, имеющего протяжённость около 18–20 км, но для выбора данных такой точности будет достаточно. На метеостанциях показатели фиксируются каждые 3 ч. Метеорологическая информация была скачана на все периоды съёмки за 6 лет, захватывая 3 дня до первого РЛИ. Время съёмки данной территории — 05:30 LT (*англ.* Local time, местное время), поэтому для температуры брались показатели в 06:00 LT, информация по осадкам и ветру — максимальная за сутки.

Методы обработки

Смещения вычисляются согласно формуле (Ferretti et al., 2007):

$$\Delta R_{diff} = -\frac{\lambda}{4\pi} \Delta \varphi_{diff},$$

где ΔR_{diff} — относительное смещение точки местности, спроецированное на направление наклонной дальности (*рис. 2*). Поэтому такие смещения носят название LOS (*англ.* line-of-sight — смещения по прямой линии видимости радара или по линии визирования) (Верба и др., 2010; Ferretti et al., 2007).

Согласно формуле, интерферограмма — интерферометрическая фаза φ — содержит вклады как высоты (φ_{topo}), так и смещения (φ_{diff}). Таким образом, для формирования дифферен-

циальной интерферограммы необходимо вычесть топографический вклад. Как правило, это делается с помощью опорной цифровой модели рельефа (ЦМР).

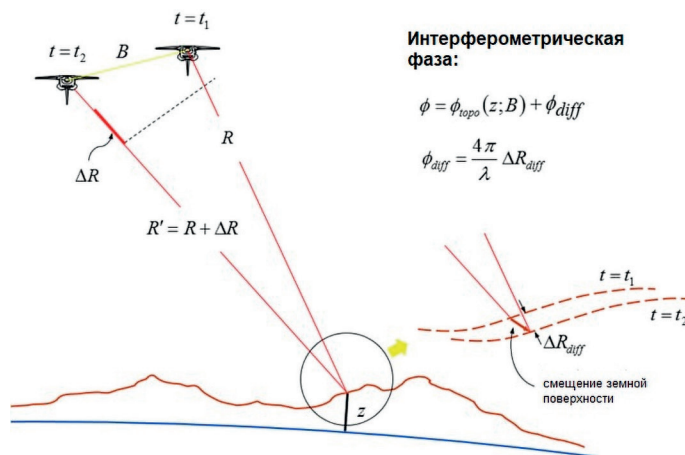


Рис. 2. Принцип определения смещения земной поверхности методом дифференциальной интерферометрии. R — расстояние от цели z до приёмника; B — перпендикулярная базовая линия; t — время съёмки; ϕ — фаза

Обработку можно условно разделить на 5 этапов (рис. 3):

1. Предобработка РЛИ.
2. Формирование интерферограммы и расчёт когерентности.
3. Формирование дифференциальной интерферограммы.
4. Развёртка фазы.
5. Формирование карты смещений.

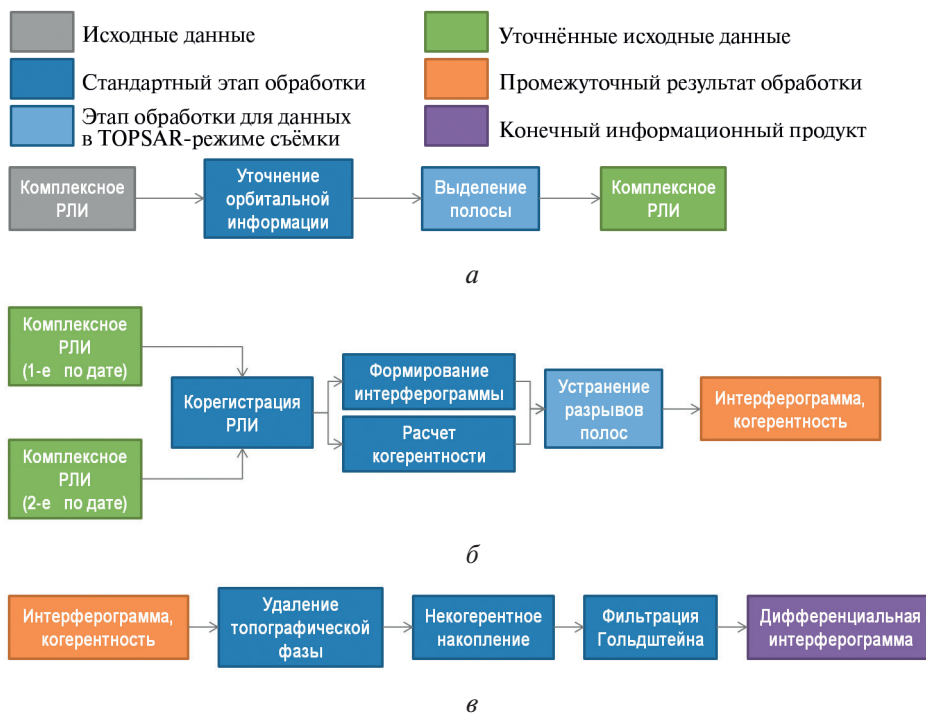


Рис. 3. Этапы обработки РЛИ: a — предобработка РЛИ; b — формирование интерферограммы; c — формирование дифференциальной интерферограммы

Все этапы обработки были реализованы в свободно распространяемом программном обеспечении SNAP (англ. Sentinel Application Platform) и автоматизированы путём создания графов (рис. 2–5).

В процессе предобработки данных была уточнена орбитальная информация на момент съёмки, что обеспечивало субпиксельное совмещение снимков, и выбран фрагмент кадра (области исследования соответствовал IW1 и бурст 7–8). Данная процедура выполнялась пакетно для всех РЛИ, перечисленных в табл. 2, путём применения графа на рис. 3а.

Далее создавались внутригодовые и межгодовые интерферограммы и изображения когерентности (см. рис. 3б). Формирование интерферограмм включало в себя стандартные процедуры по корегистрации изображений, расчёту интерферограммы и объединению бурстов. В результате обработки всего массива данных было получено 260 интерферограмм: все возможные комбинации снимков с учётом того, что ведущий снимок — более ранний по дате относительно подчинённого.

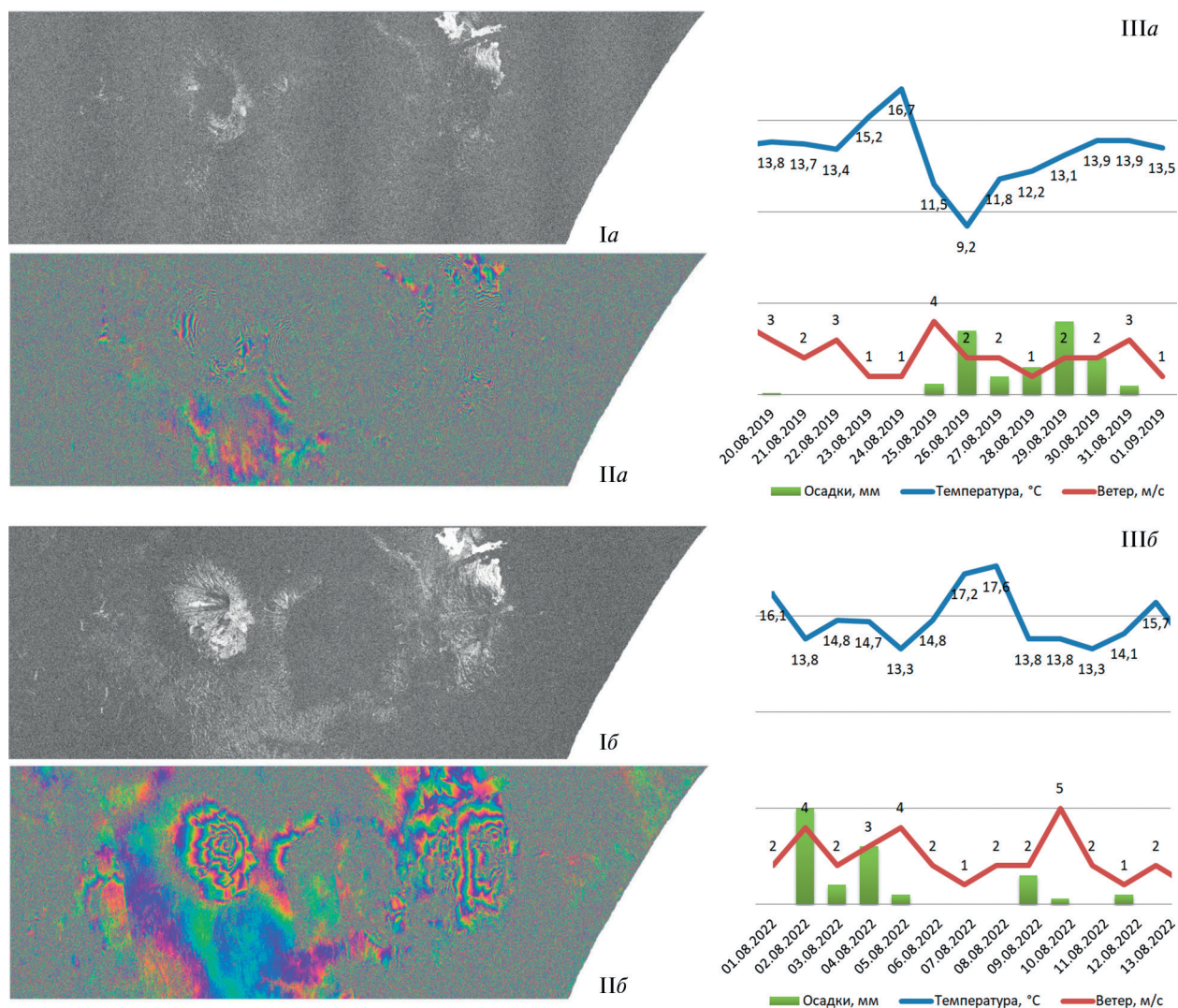


Рис. 4. Сопоставление карт когерентности (I), интерферограмм (II) и графиков изменения характеристик погоды (III): а — низкая когерентность у пары 20.08.2019 и 01.09.2019, б — приемлемая когерентность у пары 01.08.2022 и 13.08.2022

Изначально были построены внутригодовые интерферограммы, т. е. все возможные комбинации ведущего и подчинённого снимков за один год. Затем проведён анализ данных о погоде, который позволил подтвердить чувствительность когерентности к изменениям погоды

и исключить однозначно непригодные РЛИ. Было установлено следующее: если накануне съёмки выпадали осадки, то когерентность с большой долей вероятности оказывалась настолько низкой, что интерферограмма была непригодна для обработки (рис. 4(1a), см. с. 139). В то же время если осадки и перепады температур наблюдались в середине 12-дневного интервала или за несколько дней до съёмки, то когерентность была высокой — местами до 0,9 (см. рис. 4(1b)).

Зависимость когерентности от погодных условий накануне съёмки повторилась на межгодовых интерферограммах. Было важно найти пары РЛИ, по которым возможна реализация у дифференциальной интерферометрии с наибольшей временной базовой линией на основе предположения о том, что изменения за более длительный промежуток времени будут более отчётливо выражены. Вдобавок необходимо было учесть близость погодных условий в момент съёмки и накануне. Таким образом, были отобраны 8 РЛИ, среди которых самыми ранними оказались полученные 18.08.2017 и 30.08.2017.

После отбора интерферограмм и когерентностей были построены дифференциальные интерферограммы и проведено некогерентное накопление с последующей фильтрацией (см. рис. 3в). Одним из важных шагов стало удаление топографической составляющей фазы, после которого и получается дифференциальная интерферограмма. Для удаления топографической составляющей можно использовать разные ЦМР, а поскольку на качество дифференциальной интерферограммы точность ЦМР оказывает прямое влияние, проведено сравнение нескольких общедоступных ЦМР: SRTM 3Sec (англ. Shuttle Radar Topographic Mission — радиолокационная топографическая миссия шаттла), CopernicusDEM, ArcticDEM и SRTM 1Sec. Проведённое сравнение дало основание выбрать SRTM 1Sec.

Затем выполнялась развёртка фазы методом *snaphu*, пересчёт LOS-смещений и их геокодирование. В результате были получены информационные продукты — карты смещений, где опорными выступили снимками за 18.08.2017 и 30.08.2017. Для всех пар программно рассчитаны пространственные базовые линии, представленные в табл. 4 для каждого из опорных снимков.

Таблица 4. Пространственная и временная базовая линия для пар с опорными снимками за 18.08.2017 и 30.08.2017

18.08.2017	Пространственная база, м	Временная база, дни	30.08.2017	Пространственная база, м	Временная база, дни
30.08.2017	14,33	12	25.08.2018	25,44	360
25.08.2018	11,67	372	06.09.2018	55,70	372
06.09.2018	41,51	384	27.07.2019	17,43	696
27.07.2019	31,40	708	20.08.2019	42,98	720
20.08.2019	28,79	732	21.08.2021	103,10	1452
21.08.2021	88,98	1464	04.08.2022	14,71	1800
04.08.2022	5,77	1812	09.09.2022	193,64	1836
09.09.2022	179,48	1848			

Анализ рассчитанных значений базовых линий для всех выбранных пар позволяет выбрать пару, удовлетворяющую двум основным условиям: минимально возможная величина пространственной базовой линии и максимально возможная величина — временной. Таким условиям отвечает пара 18.08.2017 и 04.08.2022 с базовой линией в 5,77 м.

Финальным этапом становится анализ полученного информационного продукта на предмет корректности смещений, так как программные алгоритмы работают автоматически и не могут учесть физико-географические особенности исследуемой местности — это выполняется визуально, например с опорой на снимки в видимом диапазоне и топографическую карту местности. Так, были удалены ложные смещения, рассчитанные на участках рек и озёр.

Результаты

В итоге по выбранной интерферометрической паре снимков за 18.08.2017 и 04.08.2022 было получено пространственное распределение смещений от -15 до $+7$ см, которое приведено на рис. 5.

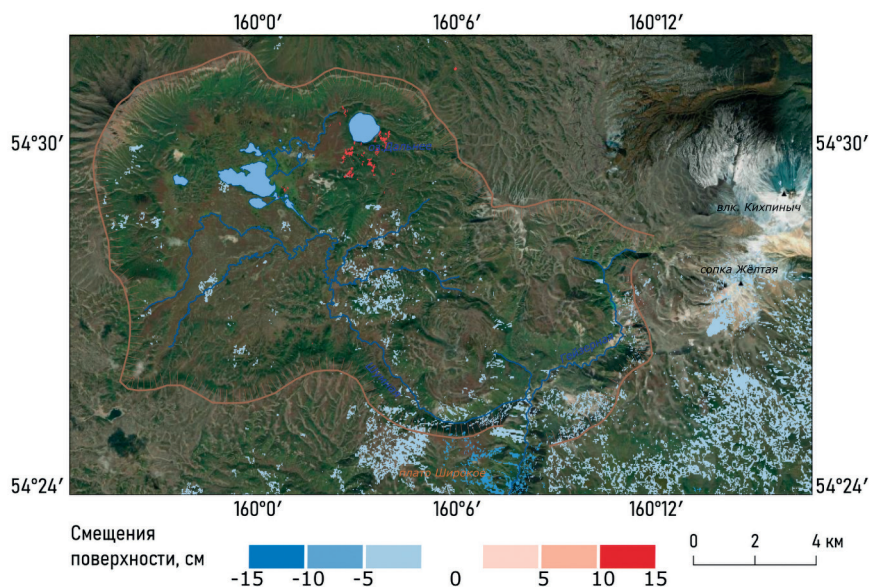


Рис. 5. Карта смещений за период с 18.08.2017 по 04.08.2022 на территорию Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии

Участки подъёма до $+7$ см обнаружены в северной части кальдеры Узон южнее маара (одноактный вулкан) оз. Дальнее. Устойчивое поднятие этого участка может означать либо начало формирования нового центра вулканической активности, либо активизацию северной оконечности экструзии сопки Белой. Но в любом случае необходимы дальнейшие наблюдения и анализ результатов съёмки последующих лет.

Незначительные опускания зафиксированы в районах южного и юго-восточного обрамления Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии, в частности на плато Широком, где авторами работы (Zelenin et al., 2020) были обнаружены многочисленные следы позднеголоценовой сейсмической активности со смещениями по разломам до 20 см за одно событие. Наиболее активные отрицательные смещения (до -15 см) выявлены в долине р. Шумной ниже впадения р. Гейзерной, в том числе на участках осыпей, для которых смещение материка вниз по склону — обычный многолетний процесс.

Обсуждение

Важным итогом проведённых работ стало отсутствие каких-либо явных значительных деформаций на участке, исследованном в работе (Lundgren, Lu, 2006) по данным Radarsat-1 около 20 лет назад. Локально здесь, как и в районе сопки Жёлтой, в 2017–2022 гг. фиксируются незначительные отрицательные смещения (см. рис. 5). Возможно, происходят медленные процессы разнонаправленной геодинамической активизации исследуемого района, которая подлежит дальнейшему изучению и обоснованию. К примеру, уточнение результатов возможно при наличии более точной ЦМР для вычитания топографической составляющей при формировании дифференциальной интерферограммы. Перспективами продолжения данного исследования становится определение смещений в полученном полигоне по восходящей орбите и при других углах визирования.

Стоит отметить существующую проблему с выбором метеостанции для исследуемой территории. Выбор был из нескольких близко расположенных метеостанций: Мильково, Кроноки и Семячик, все они находятся на расстоянии 50–100 км от кальдеры Узон, причём на значительно меньших абсолютных высотах. Так, в Мильково (179 м н.у.м. (над уровнем моря)), как правило, летняя температура выше, а осадков гораздо меньше ввиду большей континентальности климата. В то время как на исследуемой территории, расположенной на отметках 400–1500 м н.у.м., сильнее влияние моря и ниже температура из-за высоты. Кроноки и Семячик расположены на побережье — севернее и южнее соответственно, на высотах менее 30 м н.у.м. Местоположение этих станций в большей степени отражает влияние морского климата. В нашем исследовании предпочтение было отдано общедоступным данным с метеостанции Мильково. Для верификации параметров был сделан запрос в Кроноцкий государственный заповедник, где начальниками кордонов осуществляются наблюдения за метеопараметрами, необходимыми для вертолётной навигации. Информация фиксируется дважды в сутки в 09:00 и 17:00 LT. Сравнение параметров погоды показало, что различия в температуре не превышали 1–2 °С, что не критично, учитывая, что нами собирались данные по времени 06:00 LT; также подтвердилось отсутствие осадков на отобранные даты съёмки КА Sentinel-1.

Заключение

Радиолокационная дифференциальная спутниковая интерферометрия выступает незаменимым методом мониторинга состояния поверхности на труднодоступных территориях. В ходе исследования территории Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии на основе обработки радиолокационных данных со спутника Sentinel-1 были обнаружены незначительные смещения земной поверхности. В отличие от аналогичного эксперимента по данным Radarsat-1, послужившего предпосылкой к данному исследованию, нами были сформированы чёткие критерии к выбору интерферометрической пары и выработан методологический подход, в перспективе позволяющий получить кондиционные информационные продукты.

Основные этапы выбора данных включают: 1) определение направления движения носителя РСА и углов визирования с учётом возможного влияния рельефа местности, чтобы избежать радиолокационной тени и переналожений склонов на территории исследования; 2) учёт погодных условий, поскольку, несмотря на хорошо известную независимость получения РЛИ от атмосферных явлений, результат интерферометрической обработки данных сильно зависит от постоянства метеорологических параметров, прежде всего температуры и наличия осадков не только в момент съёмки, но и накануне; 3) выбор данных с минимально возможной величиной перпендикулярной базовой линии.

Признанный удовлетворительным информационный продукт по выделенным критериям был получен с нисходящей орбиты, углах визирования от 30 до 36°, при максимально похожих погодных условиях во время съёмок, при величине базовой линии 5,77 м и временной базе 1812 дней. На нём показаны положительные и отрицательные относительно линии прямой видимости РСА смещения от +7 до –15 см на территории Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии.

Авторы выражают огромную благодарность заместителю директора Кроноцкого государственного заповедника Халманову Владимиру Александровичу, а также сотрудникам Кроноцкого заповедника за всестороннюю помощь при проведении работ и предоставленные архивные материалы.

Подбор данных выполнен и методы их обработки разработаны в рамках госзадания географического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (№ 121051400061-9). Анализ интерферограмм и результатов выявления смещений выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-17-00216.

Литература

1. Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике / ред. Завадская А. В. М.: Красанд, 2015. 88 с.
2. Бадак Л. А., Костюк Е. А., Ширшова В. Ю., Захаров А. И. Методические рекомендации по проведению радиолокационной интерферометрической съемки с целью формирования цифровой модели рельефа земной поверхности // 10-я Всерос. научно-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий»: сб. тр. М.: АО «Российские космические системы», 2021. С. 139–147.
3. Белоусов В. И., Гриб Е. Н., Леонов В. Л. Геологические позиции гидротермальных систем Долины Гейзеров и кальдеры Узон // Вулканология и сейсмология. 1983. № 1. С. 65–79.
4. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
5. Добрынин И. И., Песяк Ф. В., Савин А. И., Севастьянов Н. Н. Измерение смещений земной поверхности методом радиолокационной интерферометрии с применением уголкового отражателя радиосигнала // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 113–121. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-113-121.
6. Добрынин И. И., Савин А. И., Севастьянов Н. Н. Исследование факторов, влияющих на точность измерения смещений методом радарной интерферометрии с использованием уголкового отражателя // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 29–38. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-29-36.
7. Захаров А. И., Яковлев О. И., Смирнов В. М. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. 3-е изд. М.: URSS, 2012. 248 с.
8. Захаров А. И., Захарова Л. Н., Михайлюкова П. Г. Влияние атмосферы в исследованиях динамики рельефа Толбачинского дола методами радарной интерферометрии // Тр. 7-х Всерос. Армандовских чтений. М: Полигр. центр МИ ВлГУ, 2017. С. 68–73.
9. Захаров А. И., Захарова Л. Н., Синило В. П., Денисов П. В. Влияние атмосферы на исследования пересеченного рельефа методами радарной интерферометрии // Журн. радиоэлектроники. 2023. № 2. С. 1684–1719. DOI: 10.30898/1684-1719.2023.2.6.
10. Кугаенко Ю. А., Леонов В. Л. К динамической модели магматического очага под Узон-Гейзерной депрессией // Волинцовские чтения. 2018. С. 22–23.
11. Кугаенко Ю. А., Салтыков В. А., Коновалова А. А. Локальная сейсмичность района Долины гейзеров по данным полевых наблюдений 2008–2009 гг. // Вестн. Камчатской регион. ассоциации «Учебно-науч. центр». Сер.: Науки о Земле. 2010. № 1. Вып. 15. С. 90–99.
12. Кугаенко Ю. А., Салтыков В. А., Горбатилов А. В., Степанова М. Ю. Развитие модели района Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии и вулкана Кихпинич (Камчатка) по результатам совместного анализа данных микросейсмического зондирования и локальной геодинамической активности // Физика Земли. 2015. № 3. С. 89–101. DOI: 10.7868/S0002333715030096.
13. Лебедева Е. В., Балдина Е. А., Медведев А. А. Склоновые процессы в долине р. Гейзерной (Камчатка): результаты дешифрирования разновременных космических снимков высокого пространственного разрешения // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 4. С. 3–16. DOI: 10.31857/S0435428122040095.
14. Ширшова В. Ю. Физико-географическая характеристика территории как основной фактор выбора параметров интерферометрической пары // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы 9-й Междунар. науч. конф. Красноярск: Сибирский федер. ун-т, 2022. С. 81–83.
15. Bamler R., Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry // Inverse Problems. 1998. V. 14. No. 4. P. R1–R54.
16. Cigna F., Osmanoglu B., Cabral-Cano E. et al. Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 117. P. 146–161. DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.005.
17. Ferretti A., Massonet D., Monti Guarnieri A., Prati C., Rocca F. InSAR principles-guidelines for SAR interferometry processing and interpretation. ESA Publications, 2007. V. 19. 40 p.
18. Goldstein R. M., Werner C. L. Radar interferogram filtering for geophysical applications // Geophysical Research Letters. 1998. V. 25. No. 21. P. 4035–4038. DOI: 10.1029/1998GL900033.
19. Gupta R. P. Remote sensing geology. Springer, 2017. 427 p.
20. Hanssen R. F. Radar interferometry: data interpretation and error analysis. Springer Science and Business Media, 2001. V. 2. 318 p. DOI: 10.1007/0-306-47633-9.
21. Hooper A., Segall P., Zebker H. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos // J. Geophysical Research: Solid Earth. 2007. V. 112. No. B7. DOI: 10.1029/2006JB004763.

22. Kiryukhin A. V., Rychkova T. V., Dubrovskaya I. K. Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka) and triggers of the Giant Landslide // *Applied Geochemistry*. 2012. V. 27. P. 1753–1766. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2012.02.011.
23. Lanari R., Berardino P., Bonano M. et al. Surface displacements associated with the L'Aquila 2009 Mw 6.3 earthquake (central Italy): New evidence from SBAS-DInSAR time series analysis // *Geophysical Research Letters*. 2010. V. 37. No. 20. P. 1–6. DOI: 10.1029/2010GL044780.
24. Lundgren P., Lu Z. Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations // *Geophysical Research Letters*. 2006. V. 33. No. 6. DOI: 10.1029/2005GL025181.
25. Lundgren P., Girona T., Bato M. G. et al. The dynamics of large silicic systems from satellite remote sensing observations: The intriguing case of Domuyo volcano, Argentina // *Scientific Reports*. 2020. V. 10. No. 1. P. 1–15. DOI: 10.1007/s00445-021-01457-0.
26. Massom R., Lubin D. Polar remote sensing. Chichester: Springer, 2006. V. 2. 262 p.
27. Pepe A., Calò F. A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements // *Applied Sciences*. 2017. V. 7. No. 12. Article 1264. 39 p. DOI: 10.3390/app7121264.
28. Rosen P. A., Hensley S., Chen C. Measurement and mitigation of the ionosphere in L-band interferometric SAR data // 2010 IEEE Radar Conf. IEEE, 2010. P. 1459–1463. DOI: 10.1109/RADAR.2010.5494385.
29. Sandwell D. T., Myer D., Mellors R. et al. Accuracy and resolution of ALOS interferometry: Vector deformation maps of the Father's Day intrusion at Kilauea // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2008. V. 46. No. 1. P. 524–534. DOI: 10.1109/TGRS.2008.2000634.
30. Velez M. L., Euillades P., Caselli A., Blanco M., Díaz J. M. Deformation of Copahue volcano: inversion of InSAR data using a genetic algorithm // *J. Volcanology and Geothermal Research*. 2011. V. 202. No. 1–2. P. 17–126. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2011.01.012.
31. Zelenin E., Kozhurin A., Ponomareva V., Portnyagin M. Tephrochronological dating of paleoearthquakes in active volcanic arcs: A case of the Eastern Volcanic Front on the Kamchatka Peninsula (northwest Pacific) // *J. Quaternary Science*. 2020. V. 35. P. 49–361. DOI: 10.1002/jqs.3145.

Experiment to determine the dynamics of Earth surface displacements in the Uzon-Geyser volcano-tectonic depression using Sentinel-1A differential interferometry data for 2017–2022

V. Yu. Shirshova^{1,2}, E. A. Baldina^{1,3}, E. V. Lebedeva³

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*
E-mail: vshirshova.msu@yandex.ru

² *Research Center for Earth Operative Monitoring, Moscow 127490, Russia*
E-mail: baldina@geogr.msu.ru

³ *Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia*
E-mail: Ekaterina.lebedeva@gmail.com

Volcanic and seismically active regions experience significant changes in relief, both endogenous and exogenous in nature, making monitoring of the Earth's surface in such areas relevant. By applying differential interferometry, it is possible to detect uplift and subsidence remotely. Despite the fact that the method has already confidently proved itself in solving a number of Earth sciences problems, the development of its application issues in areas which are difficult to access for regular monitoring does not lose topicality. In our work, we carried out an experiment to determine displacements in the Uzon-Geyser volcano-tectonic depression using recent Sentinel-1A radar data, guided by similar findings obtained almost 20 years ago from Radarsat-1 data. Particular attention was paid to data selection issues, considering the survey parameters and weather conditions at the time of survey, which influence the final result. On 25 images, 260 interferograms and the same number of coherence images were formed, covering the time interval from 2017 to 2022. Analysis of meteorological data at the moments of the surveys and evaluation of the terrain conditions reduced the number of suitable interferometric pairs for processing to 15. The criteria formulated in the process of work for the selection of optimal survey conditions for this area to determine the multi-year displacements of the Earth's surface on a pair of images, determined the choice of 1 pair of images — 18.08.2017 and 04.08.2022. According to the re-

sults of processing of this pair, the dips and rises in different areas of the study area from -15 to $+7$ cm were recorded.

Keywords: differential interferometry, Sentinel-1, Kamchatka, meteorological data, Uzon-Geyser volcano-tectonic depression

Accepted: 04.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-133-146

References

1. *Atlas doliny reki Geizernoi v Kronotskom zapovednike* (Atlas of the valley of the Geysernaya River in the Kronotsky Reserve), Zavadskaya A. V. (ed.), Moscow: Krasand, 2015, 88 p. (in Russian).
2. Badak L. A., Kostyuk E. A., Shirshova V. Yu., Zakharov A. I., Methodological recommendations for radar interferometric survey to form a digital elevation model of the earth's surface, *X Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskogo priborostroeniya i informatsionnykh tekhnologii"* (Proc. X All-Russian Scientific and Technical Conf. "Actual Problems of Rocket and Space Instrumentation and Information Technology"), Moscow: AO "Rossiiskie kosmicheskie sistemy", 2021, pp. 139–147 (in Russian).
3. Belousov V. I., Grib E. N., Leonov V. L., Geological positions of hydrothermal systems of the Valley of Geysers and Uzon Caldera, *Vulkanologiya i seismologiya*, 1983, No. 1, pp. 65–79 (in Russian).
4. Verba V. S., Neronskii L. B., Osipov I. G., Turuk V. E., *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Space-based ground-penetrating radar systems), Moscow: Radiotekhnika, 2010, 680 p. (in Russian).
5. Dobrynin I. I., Pesyak F. V., Savin A. I., Sevast'yanov N. N., Measurement of Earth surface displacements by radar interferometry with the use of angle reflectors of radio signal, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 5, pp. 113–121 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-113-121.
6. Dobrynin I. I., Savin A. I., Sevast'yanov N. N., Study of factors affecting the accuracy of displacement measurement by radar interferometry using corner reflectors, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 29–38 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-29-36.
7. Zakharov A. I., Yakovlev O. I., Smirnov V. M., *Sputnikovyi monitoring Zemli: Radiolokatsionnoe zondirovanie poverkhnosti* (Satellite Monitoring of the Earth: Radar Sounding of the Surface), Moscow: URSS, 2012, 248 p. (in Russian).
8. Zakharov A. I., Zakharova L. N., Mikhaylyukova P. G., Atmospheric influence in studies of the dynamics of the Tolbachinsky dale relief by radar interferometry methods, *Trudy 7-kh Vserossiiskikh Armandovskikh chtenii* (Proc. 7th All-Russian Armandov Readings), Moscow: Poligraficheskii tsentr MI VIGU, 2017, pp. 68–73 (in Russian).
9. Zakharov A. I., Zakharova L. N., Sinilo V. P., Denisov P. V., Influence of the atmosphere on studies of rugged terrain by radar interferometry methods, *Zhurnal radioelektroniki*, 2023, No. 2, pp. 1684–1719 (in Russian), DOI: 10.30898/1684-1719.2023.2.6.
10. Kugaenko Yu. A., Leonov V. L., Toward a dynamic model of the magma chamber beneath the Uzon Geyser Depression, *Volyntsovskie chteniya* (Volyntsov Readings), 2018, pp. 22–23 (in Russian).
11. Kugaenko Yu. A., Saltykov V. A., Konovalova A. A., Local seismicity of the Valley of Geysers area according to field observations 2008–2009, *Vestnik Kamchatskoi regional'noi assotsiatsii "Uchebno-nauchnyi tsentr"*, Ser.: *Nauki o Zemle*, 2010, No. 1, pp. 90–99 (in Russian).
12. Kugaenko Yu. A., Saltykov V. A., Gorbatikov A. V., Stepanova M. Yu., Development of the Uzon-Geyser-naya volcano-tectonic depression and Kikhpinych volcano model (Kamchatka) based on the results of joint analysis of microseismic sounding data and local geodynamic activity, *Fizika Zemli*, 2015, No. 3, pp. 89–101 (in Russian), DOI: 10.7868/S0002333715030096.
13. Lebedeva E. V., Baldina E. A., Medvedev A. A., Slope processes in the Geysernaya River valley (Kamchatka): results of interpretation of multi-temporal satellite images of high spatial resolution, *Geomorfologiya*, 2022, Vol. 53, No. 4, pp. 3–16 (in Russian), DOI: 10.31857/S0435428122040095.
14. Shirshova V. Yu., Physical and geographic characteristics of the territory as the main factor in the choice of interferometric pair parameters, *Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: materialy 9th Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* (Regional Problems of Earth Remote Sensing: Proc. 9th Intern. Scientific Conf.), Krasnoyarsk: Siberian Federal Univ., 2022, pp. 81–83 (in Russian).
15. Bamler R., Hartl P., Synthetic aperture radar interferometry, *Inverse Problems*, 1998, Vol. 14, No. 4, pp. R1–R54.

16. Cigna F., Osmanoglu B., Cabral-Cano E. et al., Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 117, pp. 146–161, DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.005.
17. Ferretti A., Massonet D., Monti Guarnieri A., Prati C., Rocca F., *InSAR principles-guidelines for SAR interferometry processing and interpretation*, ESA Publications, 2007, Vol. 19, 40 p.
18. Goldstein R. M., Werner C. L., Radar interferogram filtering for geophysical applications, *Geophysical Research Letters*, 1998, Vol. 25, No. 21, pp. 4035–4038, DOI: 10.1029/1998GL900033.
19. Gupta R. P., *Remote sensing geology*, Springer, 2017, 427 p.
20. Hanssen R. F., *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*, Springer Science and Business Media, 2001, Vol. 2, 318 p., DOI: 10.1007/0-306-47633-9.
21. Hooper A., Segall P., Zebker H., Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, Vol. 112, No. B7, DOI: 10.1029/2006JB004763.
22. Kiryukhin A. V., Rychkova T. V., Dubrovskaya I. K., Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka) and triggers of the Giant Landslide, *Applied Geochemistry*, 2012, Vol. 27, pp. 1753–1766, DOI: 10.1016/j.apgeochem.2012.02.011.
23. Lanari R., Berardino P., Bonano M. et al., Surface displacements associated with the L'Aquila 2009 Mw 6.3 earthquake (central Italy): New evidence from SBAS-DInSAR time series analysis, *Geophysical Research Letters*, 2010, Vol. 37, No. 20, pp. 1–6, DOI: 10.1029/2010GL044780.
24. Lundgren P., Lu Z., Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations, *Geophysical Research Letters*, 2006, Vol. 33, No. 6, DOI: 10.1029/2005GL025181.
25. Lundgren P., Girona T., Bato M. G. et al., The dynamics of large silicic systems from satellite remote sensing observations: The intriguing case of Domuyo volcano, Argentina, *Scientific Reports*, 2020, Vol. 10, No. 1, pp. 1–15, DOI: 10.1007/s00445-021-01457-0.
26. Massom R., Lubin D., *Polar remote sensing*, Chichester: Springer, 2006, Vol. 2, 262 p.
27. Pepe A., Calò F., A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements, *Applied Sciences*, 2017, Vol. 7, No. 12, Article 1264, 39 p., DOI: 10.3390/app7121264.
28. Rosen P. A., Hensley S., Chen C., Measurement and mitigation of the ionosphere in L-band interferometric SAR data, *2010 IEEE Radar Conf.*, IEEE, 2010, pp. 1459–1463, DOI: 10.1109/RADAR.2010.5494385.
29. Sandwell D. T., Myer D., Mellors R. et al., Accuracy and resolution of ALOS interferometry: Vector deformation maps of the Father's Day intrusion at Kilauea, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, No. 11, pp. 3524–3534, DOI: 10.1109/TGRS.2008.2000634.
30. Velez M. L., Euillades P., Caselli A., Blanco M., Díaz J. M., Deformation of Copahue volcano: inversion of InSAR data using a genetic algorithm, *J. Volcanology and Geothermal Research*, 2011, Vol. 202, No. 1–2, pp. 117–126, DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2011.01.012.
31. Zelenin E., Kozhurin A., Ponomareva V., Portnyagin M., Tephrochronological dating of paleoearthquakes in active volcanic arcs: A case of the Eastern Volcanic Front on the Kamchatka Peninsula (northwest Pacific), *J. Quaternary Science*, 2020, Vol. 35, pp. 49–361, DOI: 10.1002/jqs.3145.