УДК 528.852.8
DOI:10.30533/GiA-2024-022

CC BY

Использование интерферометрических данных со спутника Sentinel-1A для выявления изменений высоты поверхности Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии

М.А. Ширяев[1] ✉, **Е.А. Балдина**[1], **И.К. Лурье**[1]

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
✉ m.shiryaev.w@gmail.com

ЦИТИРОВАНИЕ Ширяев М.А., Балдина Е.А., Лурье И.К. Использование интерферометрических данных со спутника Sentinel-1A для выявления изменений высоты поверхности Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2024. Т. 68. № 3. С. 42–56. DOI:10.30533/GiA-2024-022.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА дифференциальная интерферометрия, полуостров Камчатка, смещения поверхности, обработка радиолокационных изображений, метеопараметры, когерентность

АННОТАЦИЯ Мониторинг изменений высоты поверхности средствами радиолокационной спутниковой интерферометрии актуален для районов распространения современного вулканизма и геотермальных проявлений. Метод осложнен влиянием множества факторов на фазу радиосигнала, из-за чего точность расчетов снижается. В продолжение ранних исследований был проанализирован 41 снимок Sentinel-1A с восходящей орбиты, полученный в бесснежные периоды 2017–2023 годов. Для минимизации фазовой ошибки проведен анализ большого числа факторов, влияющих на интерферометрическую когерентность, таких как метеорологические параметры, снежный и растительный покров. В итоге из 713 возможных пар снимков Sentinel-1 для выявления смещений отобраны и обработаны стандартными средствами ПО SNAP 14 пар на разные сроки. Достоверность полученных значений смещений обоснована тщательным отбором данных, который обеспечил достаточно высокие значения интерферометрической когерентности для всех временных отрезков. Анализ полученных в результате карт изменений высоты поверхности позволяет утверждать, что существенных смещений поверхности, вызываемых магматическим очагом в восточной части Узон-Гейзерной депрессии, в период с 2017 по 2023 год не наблюдалось; наибольшие изменения происходили период с 2019 по 2023 год, среднегодовые смещения поверхности в этот период составили от –18 до +8 мм/год.

1 Введение

Мониторинг изменений высоты поверхности имеет большое значение для понимания поведения вулканических и геотермальных систем и оценки потенциальных опасностей. Для отдаленных районов, где затруднены наземные измерения, особенно значимы методы радиолокационной спутниковой интерферометрии. Большой интерес с точки зрения мониторинга изменений высоты поверхности представляют геотермальные зоны, находящиеся в районах распространения современного вулканизма. В пределах геотермальных зон периодические изменения высоты поверхности могут быть связаны с движением жидкостей под землей либо с нагревом и колебанием давления жидкостей над глубоко расположенными магматическими очагами [1–3].

Радиолокационная интерферометрия — метод обработки пар радарных снимков, который показал себя одним из наиболее надежных способов расчета высот и смещений. В основе метода лежит расчет разности фаз сигналов, зарегистрированных от участка местности радиолокационной системой с двух близких точек пространства. Использование метода радиолокационной интерферометрии началось в 1970-х годах, и в настоящее время он детально описан во многих научных публикациях и в учебных пособиях [4–6], применяется в широком спектре направлений оценки смещений [7]. Накопился большой опыт выявления методом радиолокационной интерферометрии смещений, вызванных тектонической активностью [8–10], склоновыми процессами [11, 12], вулканической активностью [13, 14], криогенными процессами [15], техногенным воздействием [16, 17], а также описано применение данного метода при изучении изменений других поверхностей (например, ледников и снежного покрова [18, 19]).

При выявлении изменений высоты поверхности методом дифференциальной интерферометрии приходится учитывать разнообразные факторы, приводящие к фазовой декорреляции, помимо собственно смещений рельефа, представляющих предмет исследования. К числу таких факторов относятся изменение состояния растительного покрова [20, 21], степени увлажнения поверхности [22, 23] и высоты снежного покрова [24, 25], а также состояние атмосферы [5].

Целью исследования является анализ возможности использования доступных интерферометрических данных со спутника Sentinel-1 для выявления смещений в пределах территории Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии. Задачами исследования являются выбор данных радиолокационной съемки и сведений о состоянии территории в моменты съемок, анализ факторов, влияющих на качество интерферометрической обработки, расчет смещений для исследуемой территории и анализ результатов. Настоящий материал является продолжением исследований [26] при использовании набора данных с отличающейся геометрией съемки и акцентом на учет влияния метеопараметров.

2 Материалы и методы

2.1 Территория исследования

Узон-Гейзерная вулкано-тектоническая депрессия — кальдерный комплекс, включающий в себя кальдеры Узон и Пра-Узон, расположенный на востоке Камчатского полуострова в 180 км к северо-востоку от Петропавловска-Камчатского (рис. 1). Сформировался он в верхнем плейстоцене (примерно 80–40 тыс. лет назад). Комплекс имеет площадь 135 км^2, с запада на восток протягивается на 16–18 км, с севера на юг — на 12 км. Его наинизшая точка

находится на высоте 600 м; наивысшая, Бараний пик, имеет высоту 1610 м[1,2]. В восточной части Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии протекает река Гейзерная, ее протяженность составляет 12 км, перепад высот между истоком и устьем — более 700 м. Долина реки Гейзерной с западной стороны примыкает к вулкану Кихпинычу — действующему стратовулкану, включающему несколько конусов с максимальной высотой (конуса Савича) 1552 м[3]. В пределах долины реки Гейзерной расположена Долина гейзеров — одна из крупнейших геотермальных зон, входящая в состав Кроноцкого государственного биосферного заповедника. Кальдера Узон, находящаяся в западной части депрессии — заболоченного понижения с озерами и термопроявлениями, — второй, помимо долины Гейзеров, участок гидротермальной активности[4] [27].

Узон-Гейзерная вулкано-тектоническая депрессия на снимке Sentinel-2 от 16.09.2021 /
Sentinel-2 image of the Uzon-Geyser volcano-tectonic depression from 16.09.2021



Местоположение депрессии на полуострове Камчатка /
Location of the depression on the Kamchatka Peninsula



Рис. 1
Узон-Гейзерная вулкано-тектоническая депрессия на снимке Sentinel-2 от 16.09.2021 и ее местоположение на полуострове Камчатка

Fig. 1
Sentinel-2 image of the Uzon-Geyser volcano-tectonic depression from 16.09.2021 and its location on the Kamchatka Peninsula

Основные процессы в пределах Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии обусловлены неглубоко залегающими магматическими очагами[4], образующими гейзерные термальные поля и придающими территории высокую динамичность [28, 29]. В исследовании [30] на территории Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии по снимкам RADARSAT-1 за период с 1999 по 2004 год анализировались изменения высоты поверхности, и по результатам расчетов установлено, что в период с 2000 по 2003 год произошло поднятие на 15 см. При этом в том же исследовании отмечено, что в периоды с 1999 по 2000 год и с 2003 по 2004 год поднятий не выявлено. Поднятие произошло на площади 15,4×8,7 км, оно вытянуто в северо-восточном направлении и имеет очаг в районе восточного борта депрессии у подножия вулкана Кихпиныча. Исследователями были смоделированы расположение и глубина магматического очага, наличие которого было описано ранее[4], что согласуется с результатами последующих геофизических исследований [29].

Предполагается, что тектонические поднятия в районе восточного борта депрессии способствуют активизации склоновых процессов в пределах долины реки Гейзерной [28, 29]. Самые крупные оползни произошли в 1981,

1 Леонов В.Л., Гриб Е.Н., Карпов Г.А. и др. Кальдера Узон и Долина Гейзеров // Активные вулканы Камчатки: в 2 т. М.: Наука, 1991. Т. 2. С. 94–141.

2 Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике / под ред. А.В. Завадской. М.: КРАСАНД, 2015. 88 с.

3 Брайцева О.А., Флоренский И.В., Волынец О.Н. Вулкан Кихпиныч // Активные вулканы Камчатки: в 2 т. М.: Наука, 1991. Т. 2. С. 74–93.

4 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.

2007 и 2014 годах. Так, оползень, сошедший 3 июня 2007 года и сопровождавшийся селевым потоком, кардинально изменил облик долины — в результате обломочный материал перекрыл русло реки, образовав озеро, и некоторые гейзеры были утеряны безвозвратно [31]. Наблюдается активизация склоновых процессов на левом борту долины: площадь склонов со следами активизации процессов рельефообразования за 50 лет выросла в 1,5–2,5 раза. Кроме того, в верхней части долины были зафиксированы постепенное отклонение ручья Белого на север и изменение направления течения ручья Тундрового, берущих начало на юго-западном склоне сопки Желтой, что дает основание предполагать продолжение воздымания поверхности на обозначенном участке [32]. Активность склоновых процессов в этом уникальном месте исследовалась полевыми и геофизическими [29, 31], аэрофотограмметрическими [33] методами, в основном носящими локальный характер. Для одновременного наблюдения всей обширной площади Узон-Гейзерной депрессии представляется актуальным применение методов дифференциальной радарной интерферометрии. Организация площадного мониторинга возможна на основе доступных данных со спутника Sentinel-1.

2.2 Особенности материала исследования

Для исследования были использованы данные SLC VV-поляризации со спутника Sentinel-1A, полученные из архива Центра обработки данных и наземной станции спутникового слежения Геофизического института Университета Аляски[5]. Поскольку участок, вызывающий наибольший интерес [30], имеет западную экспозицию, во избежание его попадания в теневую область были выбраны снимки, снятые с восходящего витка орбиты (при направлении радиолокатора на северо-восток), что противоположно данным, также использованным для выявления смещений [26]. Номер витка единый — 140, номер сцены — 176, время съемки — около 7 часов по гринвичскому времени (рис. 2).

На следующем этапе требовалось отобрать наиболее пригодные снимки. При этом акцент делался на состоянии местности в моменты съемок, поскольку заметные различия в ее состоянии снижают когерентность (согласованность фаз двух радиолокационных снимков) и влияют на пригодность интерферометрических пар для расчета смещений. Кроме того, было определено значение

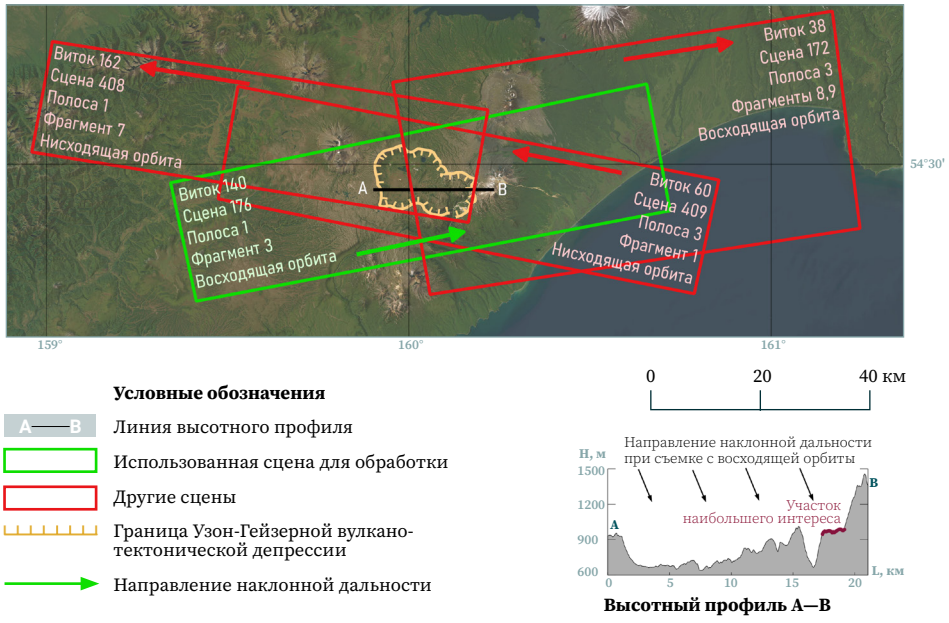


Рис. 2
Параметры и границы сцен, покрывающих Узон-Гейзерную вулкано-тектоническую депрессию

Fig. 2
Metadata and boundaries of bursts that are covering Uzon-Geyser volcano-tectonic depression

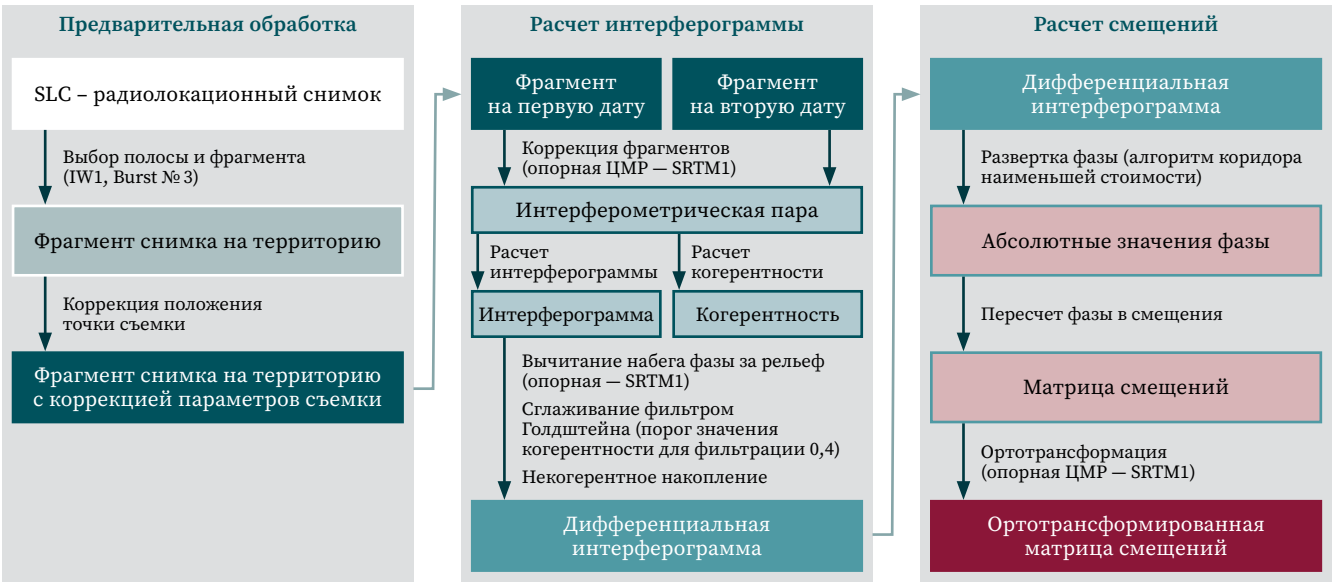
5 Alaska Satellite Facility. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://asf.alaska.edu/ (дата обращения: 19.04.2024).

оптимальной интерферометрической базы, минимизирующее ошибки измерения высот. Считается, что для исследования смещений поверхности (дифференциальной интерферометрии) оно не должно превышать 20 % предельного значения [5], то есть для снимков спутников Sentinel-1 составляет менее 150 м. При условиях большого перепада высот было решено установить пороговое значение базовой линии в 75 м.

Всего с 2017 по 2023 год был выбран 41 снимок в бесснежные периоды, в дальнейшем отборе снимков для обработки принималось во внимание состояние местности в моменты съемок. Учитывались такие факторы, как наличие облачности, интенсивность осадков, наличие снежного покрова, значения температуры, влажности и атмосферного давления. Выбор снимков осложнялся невозможностью экстраполировать метеоданные, полученные с ближайших метеостанций, на рассматриваемую территорию ввиду существенных различий в географическом положении. Метеостанция Семячик, откуда были получены данные о погоде[6], находится на 30 км юго-восточнее долины реки Гейзерной на побережье Тихого океана на высоте 27 м, поэтому данные могут существенно отличаться от реального состояния местности, расположенной выше 600 м над уровнем моря (что проявляется, в частности, в различии сроков установления снежного покрова, в наличии или отсутствии облачности). По той же причине ограниченно пригодны метеоданные со станции Мильково, расположенной в 100 км в долине реки Камчатки (высота над ур. м. — 179 м). Для частичного решения этой проблемы были привлечены и проанализированы снимки с метеорологических спутников. Совпадение характера облачности на исследуемой территории и по данным со станции Семячик позволяет определить наличие осадков в области интереса. Для этого были использованы снимки с систем AVHRR на метеорологических спутниках NOAA-17, NOAA-18 и NOAA-19 и МСУ-МР на метеорологическом спутнике Метеор-М, загруженные с архива НИЦ «Планета»[7]. Снимки получены в близкие к срокам съемок со спутника Sentinel-1A моменты. Доля покрытия исследуемой территории снегом на даты съемок определялась по снимкам Sentinel-2 и Landsat-8, Landsat-9 на ближние даты методом сегментации изображений. Интерферометрическая обработка радиолокационных снимков осуществлялась в ПО SNAP[8] (рис. 3).

Рис. 3
Последовательность расчета смещений

Fig. 3
Sequence of displacements calculation



6 Погода и климат. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.pogodaiklimat.ru/ (дата обращения: 19.04.2024).

7 Объединенный картографический интерфейс НИЦ «Планета». [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://moscow.planeta.smislab.ru/geocover_v4/planeta.sht (дата обращения: 19.04.2024).

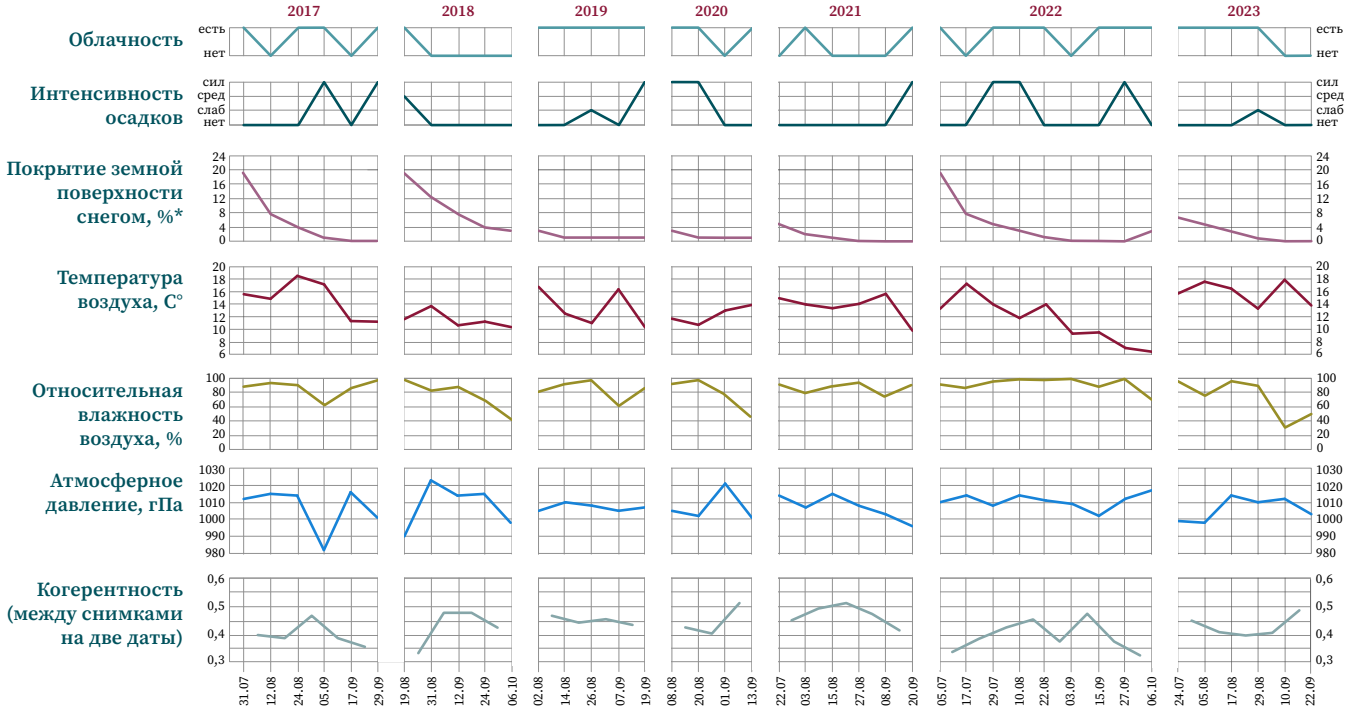
8 Braun A., Veci L. Sentinel-1 Toolbox TOPS Interferometry Tutorial. 2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial_v2.pdf (дата обращения: 19.04.2024).

3 Результаты

Для отбора наиболее пригодных снимков были сопоставлены характеристики состояния местности в моменты съемок со значениями когерентности соседних по датам (с интервалом в 12 суток) снимков (рис. 4). Так было установлено, что когерентность наиболее чувствительна к осадкам — снимки, в момент получения которых выпадали осадки, были отсеяны в первую очередь. Когерентность снижается и у пар снимков, полученных в даты, между которыми был заметен большой перепад температур воздуха. При отборе приоритет также отдавался датам съемок с отсутствием облачности на момент съемки, минимальным покрытием снега (однако в некоторые годы снежный покров сохранялся и в теплый период). Вегетация растительности в этом районе идет весь короткий бесснежный период в 2–3 месяца, поэтому избежать ее влияния практически нельзя.

Рис. 4
Характеристики состояния местности в моменты съемки и когерентность снимков в соседние даты

Fig. 4
Characteristics of terrain state at the moments of imagery and coherence of images at neighboring dates



* В окрестности долины р. Гейзерной и вулкана Кихпиныча

В результате из 41 снимка, первоначально отобранного на бесснежные периоды каждого года, на основе анализа погодных условий в моменты съемок были выбраны 15 снимков. На следующем этапе из них были составлены пары по величине базовой линии и сходству погодных условий, всего 35 пар (с временной базой от 1 года) из 109 возможных. Однако в полученном наборе есть пары на одни и те же сроки (например, 3 пары за 2019–2021 годы), поэтому из этого набора можно отобрать наиболее пригодные. Таким образом, из начального набора в 713 возможных пар снимков Sentinel-1 на разные годы для выявления смещений методом двухпроходной интерферометрии были отобраны 14 пар (табл. 1), которые и были использованы для обработки. Минимальная временная база между съемками составляет 1 год, максимальная — 5 лет. Стоит отметить, что для всех пар радиолокационных снимков почти на всей территории исследования когерентность выше 0,5, и лишь на отдельных пикселях значения когерентности меньше 0,4, что является результатом отбора данных в целях минимизации влияния факторов состояния местности. Проведенный отбор снимков повысил достоверность полученного результата.

Таблица 1
Характеристики интерферометрических пар снимков Sentinel-1, отобранных для расчетов смещений

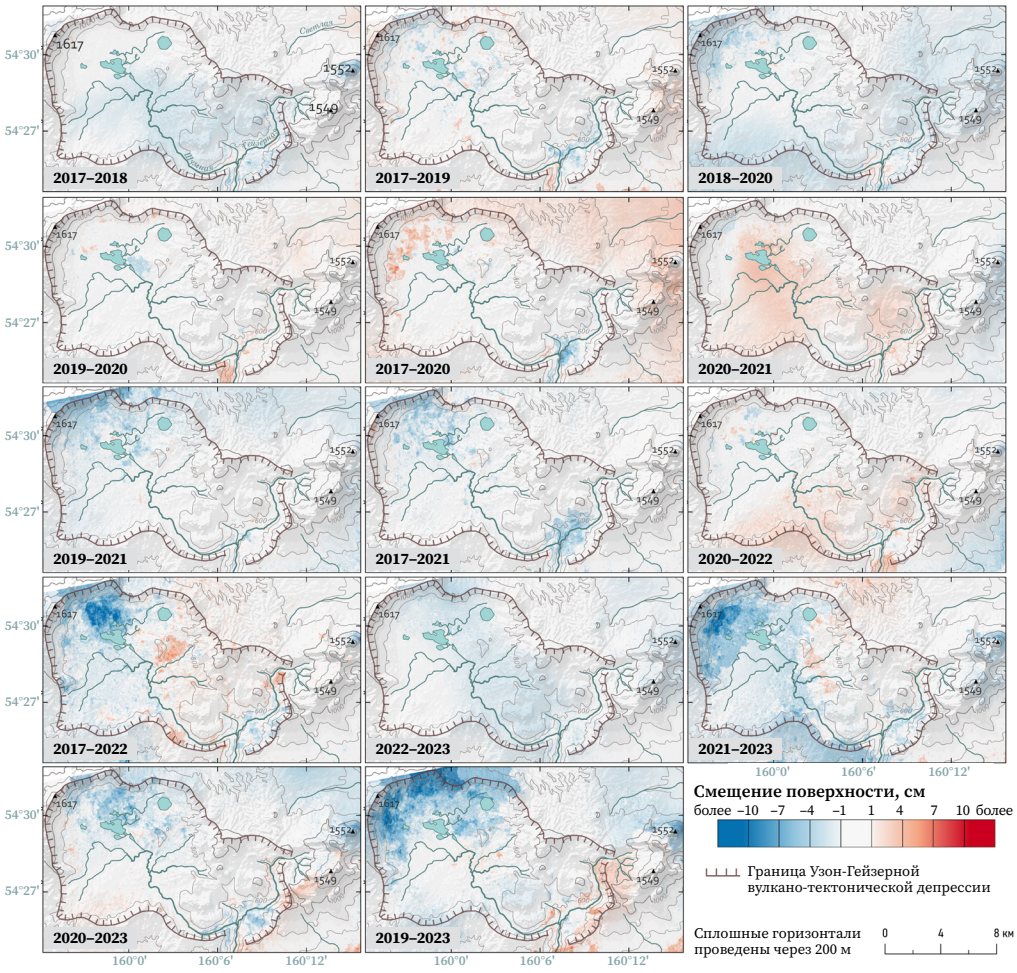
Table 1
Characteristics of interferometric pairs of Sentinel-1 images selected for displacements calculations

Основной снимок (дата съемки)	Вспомогательный снимок (дата съемки)	Базовая линия, м	Временная база, сутки	Средняя когерентность на исследуемую территорию
17.09.2017	06.10.2018	–44	384	0,57
17.09.2017	14.08.2019	–16	696	0,56
17.09.2017	01.09.2020	18	1080	0,55
17.09.2017	27.08.2021	–34	1440	0,54
17.09.2017	15.09.2022	–70	1824	0,54
24.09.2018	01.09.2020	–70	708	0,56
14.08.2019	01.09.2020	34	384	0,56
14.08.2019	27.08.2021	–18	744	0,54
07.09.2019	10.09.2023	–21	1464	0,54
01.09.2020	08.09.2021	–2	372	0,56
13.09.2020	15.09.2022	–8	744	0,55
13.09.2020	22.09.2023	–43	1104	0,55
27.08.2021	22.09.2023	–72	756	0,54
15.09.2022	22.09.2023	–35	372	0,56

По подобранным парам были рассчитаны изменения высоты поверхности и построены соответствующие растры смещений для различных интервалов времени за период с 2017 по 2023 год на всю территорию Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии и ближайшие окрестности (рис. 5).

Рис. 5
Рассчитанные смещения поверхности на исследуемой территории за различные периоды (по интерферометрическим парам из таблицы 1)

Fig. 5
Calculated surface displacements in the study area for different periods by interferometric pairs from Table 1

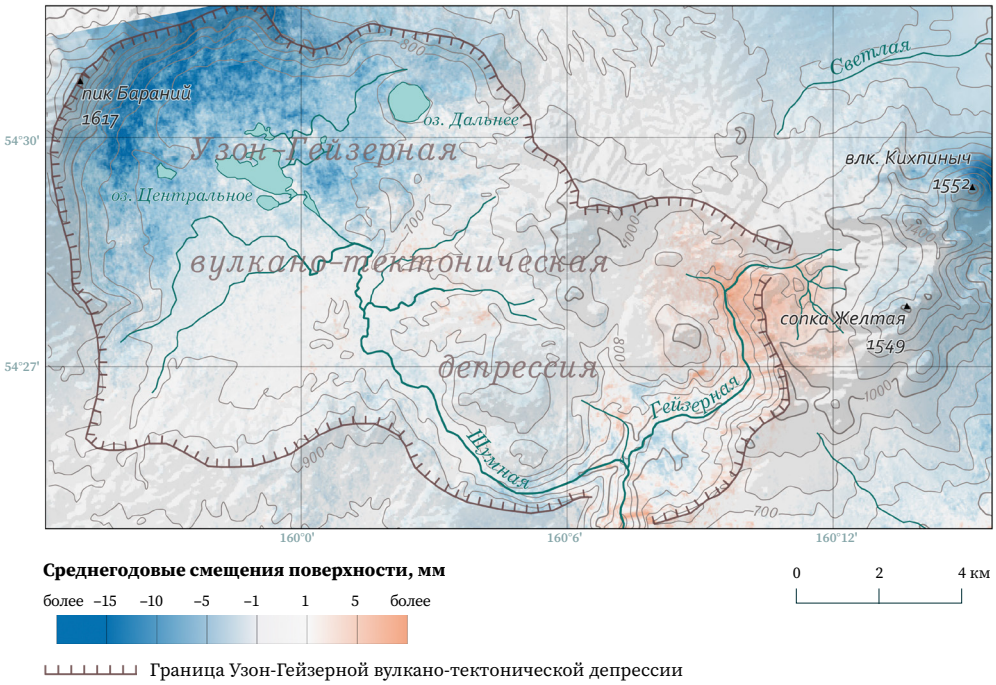


4 Обсуждение

Полученные в результате карты изменений высоты поверхности за несколько временных отрезков в течение 6-летнего периода в целом демонстрируют несущественные изменения: значения вертикальных движений не превышают 1–2 см. Незначительные хаотичные поднятия и опускания земной поверхности в пределах исследуемой территории могут быть объяснены возможными проявлениями газогидротермальной деятельности (динамикой потоков флюидов и изменениями давления в термальном очаге) [1–3]. Основные локальные изменения в пределах котловины произошли в период с 2019 по 2023 год. Так, в районе эпицентра поднятия 2000–2003 годов [30] также произошло увеличение высоты поверхности до 3 см в период с 2019 по 2023 год, или около 7–8 мм/год (рис. 6). Такая скорость поднятий гораздо ниже, чем в период с 2000 по 2003 год [Там же]. Это позволяет утверждать, что смещений поверхности, вызываемых динамикой магматического очага в восточной части Узон-Гейзерной депрессии, в период с 2017 по 2023 год не произошло. Эти результаты согласуются с результатами, полученными на основе материалов съемки с другой орбиты [26]. Однако в пределах депрессии Узон выделяется участок в северо-западной ее части между пиком Бараньим (вулканом Узоном) и озером Центральным, где за период с 2019 по 2023 год рассчитанные значения опусканий поверхности достигают 10 см, или в среднем 18 мм/год (рис. 6). Поскольку опускания зафиксированы в результате расчетов по 6 интерферометрическим парам, несмотря на то что экспозиция склонов этого участка противоположна направлению съемки, есть основание полагать, что факт снижения поверхности на данном участке правдоподобен и может также объясняться возможными проявлениями газогидротермальной деятельности. Опускания поверхности зафиксированы и в районе схода оползня 2007 года в период с 2017 по 2021 год. Они могут быть связаны с продолжающимися склоновыми процессами и трансформацией тела оползня и достигают 5 см. Кроме того, в период с 2017 по 2022 год отмечается поднятие земной поверхности до 7 см южнее маара озера Дальнего, также определенное расчетами по материалам с нисходящей орбиты [26].

Рис. 6
Среднегодовые смещения поверхности за 2019–2023 гг.

Fig. 6
Mean surface deformation velocity for 2019–2023



5 Выводы

Таким образом, интерферометрические данные Sentinel-1 могут быть использованы для выявления поднятий и опусканий земной поверхности в районе Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии. Детальный учет условий среды в моменты интерферометрической съемки, таких как осадки, облачность, температура, наличие снежного покрова, позволил отобрать наиболее пригодные снимки и сформировать пары для расчета смещений методом дифференциальной радарной интерферометрии. В результате были рассчитаны смещения на различные перекрывающиеся периоды между 2017 и 2023 годами. Так, значения поднятия поверхности в районе эпицентра 2000–2003 годов не превышали 3 см в период с 2019 по 2023 год. Это позволяет утверждать, что существенных смещений поверхности, вызываемых магматическим очагом в районе долины реки Гейзерной, в рассматриваемый период (2017–2023 годы) не произошло. Кроме того, рассчитанные в период с 2019 по 2023 год значения снижения поверхности до 10 см в северо-западной части депрессии дают основание говорить о продолжении проявлений магматизма в том числе в западной части комплекса, а хаотичность изменения скоростей вертикальных движений свидетельствует о сложности исследований явления.

БЛАГОДАРНОСТИ Работа проведена в рамках темы государственного задания кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова № 121051400061-9.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Manzo M., Ricciardi G.P., Casu F., et al. Surface deformation analysis in the Ischia Island (Italy) based on spaceborne radar interferometry // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2006. Vol. 151. No. 4. P. 399–416. DOI:10.1016/j.jvolgeores.2005.09.
2. Tizzani P., Battaglia M., Castaldo R., et al. Magma and fluid migration at Yellowstone Caldera in the last three decades inferred from InSAR, leveling, and gravity measurements // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2015. Vol. 120. No. 4. P. 2627–2647. DOI:10.1002/2014jb011502.
3. Wang J., Lu Z., Gregg P.M., et al. Evolution of the magma system at Makushin volcano, Alaska, from 2004 to 2021 // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2023. Vol. 446. DOI:10.1016/j.jvolgeores.2023.107991.
4. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г. и др. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
5. Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. М.: Красанд, 2012. 248 с.
6. Hanssen R.F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer, 2001. 318 p.
7. Энтин А.Л., Харченко С.В., Кедич А.И. и др. Современный опыт использования радиолокационной интерферометрии для регистрации изменений высотных отметок поверхности суши // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 2. С. 27–42. DOI:10.31857/S0435428122020067.
8. Михайлов В.О., Назарян А.Н., Смирнов В.Б. и др. Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 г. // Физика Земли. 2010. № 2. С. 3–16.
9. Burgmann R., Rosen P.A., Fielding E.J. Synthetic aperture radar interferometry to measure earth's surface topography and its deformation // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2000. Vol. 28. P. 169–210. DOI:10.1146/annurev.earth.28.1.169.
10. Elliott J., Walters R., Wright J. The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes // Nature Communications. 2016. Vol. 7. P. 1–16.
11. Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И. и др. Мониторинг оползневых процессов с помощью космических интерферометрических радаров L-диапазона на примере обрушения склона берега реки Бурея // Исследование Земли из космоса. 2019. № 5. С. 3–14. DOI:10.31857/S0205-9614201953-14.

12. Cascini L., Fornaro G., Peduto D. Advanced low- and full-resolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales // Engineering Geology. 2010. Vol. 112. P. 29–42.
13. Михайлюкова П.Г., Тутубалина О.В. Картографирование вулканических извержений на основе радиолокационной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 153–163. DOI:10.21046/2070-7401-2016-13-2-153-163.
14. Mania R., Walter T., Belousova M., et al. Deformations and Morphology Changes Associated with the 2016-2017 Eruption Sequence at Bezymianny Volcano, Kamchatka // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. P. 1–23. DOI:10.3390/rs11111278.
15. Liu L., Zhang T., Wahr J. InSAR measurements of surface deformation over permafrost on the North Slope of Alaska // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2010. Vol. 115. No. 3. P. 1–14.
16. Баранов Ю.Б., Кантемиров Ю.И., Киселевский Е.В. и др. Применение метода радиолокационной интерферометрии при маркшейдерском контроле смещений земной поверхности, вызванных разработкой месторождений нефти и газа // Известия вузов. Горный журнал. 2008. № 2. С. 45–53.
17. Hu B., Chen L., Zou Y., et al. Methods for Monitoring Fast and Large Gradient Subsidence in Coal Mining Areas Using SAR Images: A Review // IEEE Access. 2019. Vol. 9. P. 159018–159035. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3126787.
18. Дагуров П.Н., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В. и др. Радиолокационная дифференциальная интерферометрия для определения параметров снежного покрова // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 5. С. 1–22 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://jre.cplire.ru/jre/may17/1/text.pdf (дата обращения: 19.04.2024).
19. Sharov A., Nikolskiy D. Semi-controlled interferometric mosaic of the largest European glacier // Proceedings of the Envisat Symposium ESA SP-636. Montreux, 2007. P. 1–7.
20. Михайлюкова П.Г., Захаров А.И., Захарова Л.Н. Районирование Толбачинского Дола на основе значений интерферометрической когерентности радиолокационных сигналов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 85–98. DOI:10.21046/2070-7401-2020-17-2-85-98.
21. Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Технология совместного анализа временных рядов изображений интерферометрической когерентности Sentinel-1 и вегетационного индекса по данным Sentinel-2 для мониторинга сельскохозяйственных полей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 61–72. DOI:10.21046/2070-7401-2020-17-4-61-72.
22. Rabus B., When H., Nolan M. The Importance of Soil Moisture and Soil Structure for InSAR Phase and Backscatter, as Determined by FDTD Modeling // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2010. Vol. 48. No. 5. P. 2421–2429. DOI:10.1109/TGRS.2009.2039353.
23. Zwieback S., Hensley S., Hajnsek I. Assessment of soil moisture effects on L-band radar interferometry // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 164. P. 77–89. DOI:10.1016/j.rse.2015.04.012.
24. Достовалов М.Ю., Трошко К.А. Экспериментальная оценка когерентности по амплитудным изображениям радиолокатора с синтезированной апертурой Sentinel-1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 9–18. DOI:10.21046/2070-7401-2020-17-2-9-18.
25. Ширшова В.Ю., Балдина Е.А. Применение мультивременного композита с когерентностью (МТС) для изучения сезонной изменчивости поверхности о. Визе в целях его картографирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 79–91. DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-4-79-91.
26. Ширшова В.Ю., Балдина Е.А., Лебедева Е.В. Опыт применения метода дифференциальной интерферометрии для определения смещений земной поверхности в Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии по данным Sentinel-1A за 2017–2022 годы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 4. С. 133–146. DOI:10.21046/2070-7401-2023-20-4-133-146.
27. Мороз Ю.Ф., Карпов Г.А., Мороз Т.А. и др. Геоэлектрическая модель кальдеры Узон на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2014. № 5. С. 38–51. DOI:10.7868/S020303061405006X.

28. Лебедева Е.В., Сугробов В.М., Чижова В.П. и др. Долина р. Гейзерной (Камчатка): гидротермальная деятельность и особенности рельефообразования // Геоморфология. 2020. № 2. С. 60–73. DOI:10.31857/S0435428120020066.
29. Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатиков А.В. и др. Развитие модели района Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии и вулкана Кихпиныч (Камчатка) по результатам совместного анализа данных микросейсмического зондирования и локальной геодинамической активности // Физика Земли. 2015. № 3. С. 89–101. DOI:10.7868/S0002333715030096.
30. Lundgren P., Lu Z. Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations // Geophysical Research Letters. 2006. Vol. 33. No. 6. P. 1–4. DOI:10.1029/2005GL025181.
31. Леонов В.Л. Геологические предпосылки и возможность прогноза оползня, произошедшего 3 июня 2007 г. в Долине Гейзеров, Камчатка // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России: труды региональной научно-технической конференции: в 2 т. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. Т. 1. С. 91–95.
32. 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.
33. Двигало В.Н., Мелекесцев И.В. Геолого-геоморфологические последствия катастрофических обвальных и обвально-оползневых процессов в Камчатской Долине Гейзеров (по данным аэрофотограмметрии) // Вулканология и сейсмология. 2009. № 5. С. 24–37.

АВТОРЫ

Ширяев Михаил Андреевич
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия
кафедра картографии и геоинформатики, географический факультет
0009-0004-7481-7483

Балдина Елена Александровна
baldina@geogr.msu.ru
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия
кафедра картографии и геоинформатики, географический факультет
канд. геогр. наук, доцент
0000-0001-8231-3403

Лурье Ирина Константиновна
lurie@mail.ru
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия
кафедра картографии и геоинформатики, географический факультет
д-р геогр. наук, профессор

Поступила 20.04.2024. Принята к публикации 21.06.2024. Опубликована 28.06.2024.

UDC 528.852.8
DOI:10.30533/GiA-2024-022

CC BY

Use of the Sentinel-1A satellite DInSAR data for surface elevation changes detection of the Uzon-Geyser volcano-tectonic depression

Mikhail A. Shiryaev[1] ✉, **Elena A. Baldina**[1], **Irina K. Lurie**[1]

[1] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
✉ m.shiryaev.w@gmail.com

CITATION Shiryaev MA, Baldina EA, Lurie IK. Use of the Sentinel-1A satellite DInSAR data for surface elevation changes detection of the Uzon-Geyser volcano-tectonic depression. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2024;68(3): 42–56. DOI:10.30533/GiA-2024-022.

KEYWORDS DInSAR, Kamchatka peninsula, surface displacements, meteorological data, coherence

ABSTRACT Monitoring of surface elevation changes by DInSAR method is relevant for areas of modern volcanic and geothermal areas. The method is complicated by the influence of many factors on the phase which reduces the accuracy of calculations. Continuing earlier studies, we used 41 Sentinel-1A images from ascending orbit for the snow-free periods of 2017-2023. We analyzed a large number of factors affecting interferometric coherence to minimize phase error, such as meteorological parameters, snow and vegetation cover. As a result, we selected 14 pairs of Sentinel-1A images for different dates from 713 possible pairs for detection of offsets and processed using standard SNAP software tools. The reliability of the obtained displacement values was justified by careful data selection, which provided high values of interferometric coherence for all time intervals. Analysis of the resulting maps of surface height changes allows us to state that no significant surface displacements caused by the magmatic center in the eastern part of the Uzon-Geyser Depression were observed in the period from 2017 to 2023. The biggest changes occurred in the period from 2019 to 2023, the average deformation velocity in this period ranged from –18 to +8 mm/year.

ACKNOWLEDGEMENTS The work was carried out under the theme of the state assignment of the Department of Cartography and Geoinformatics, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University No. 121051400061-9.

REFERENCES

1. Manzo M, Ricciardi GP, Casu F, et al. Surface deformation analysis in the Ischia Island (Italy) based on spaceborne radar interferometry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2006;151(4): 399–416. DOI:10.1016/j.jvolgeores.2005.09.

2. Tizzani P, Battaglia M, Castaldo R, et al. Magma and fluid migration at Yellowstone Caldera in the last three decades inferred from InSAR, leveling, and gravity measurements. ***Journal of Geophysical Research: Solid Earth***. 2015;120(4): 2627–2647. DOI:10.1002/2014jb011502.
3. Wang J, Lu Z, Gregg PM, et al. Evolution of the magma system at Makushin volcano, Alaska, from 2004 to 2021. ***Journal of Volcanology and Geothermal Research.*** 2023;446: 1–11. DOI:10.1016/j.jvolgeores.2023.107991.
4. Verba VS, Neronskij LB, Osipov IG, et al. Radiolokacionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya [Space-based radar systems for Earth observation]. Moscow: Radiotekhnika; 2010. 680 p. (In Russian).
5. Zakharov AI, Yakovlev OI, Smirnov VM. Sputnikovyj monitoring Zemli: Radiolokacionnoe zondirovanie poverkhnosti [Satellite monitoring of the Earth. Surface radar sensing]. Moscow: Krasand; 2012. 248 p. (In Russian).
6. Hanssen RF. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer; 2001. 318 p.
7. E'ntin AL, Kharchenko SV, Kedich AI, et al. Sovremennyj opyt ispol'zovaniya radiolokacionnoj interferometrii dlya registracii izmenenij vysotnykh otmetok poverkhnosti sushi [The modern state of radar interferometry using for estimation of the land surface displacements]. ***Geomorfologiya.*** 2022;53(2): 27–42. (In Russian). DOI:10.31857/S0435428122020067.
8. Mikhajlov VO, Nazaryan AN, Smirnov VB, et al. Sovmestnaya interpretaciya dannykh differencial'noj sputnikovoj interferometrii i GPS na primere Altajskogo (Chujskogo) zemletryaseniya 27.09.2003 g. [Joint inversion of the differential satellite interferometry and GPS data: a case study of Altai (Chuia) earthquake of September 27, 2003]. ***Phizika Zemli***. 2010;2: 3–16. (In Russian).
9. Burgmann R, Rosen PA, Fielding EJ. Synthetic aperture radar interferometry to measure earth's surface topography and its deformation. ***Annual Review of Earth and Planetary Sciences***. 2000;28: 169–210. DOI:10.1146/annurev.earth.28.1.169.
10. Elliott J, Walters R, Wright J. The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes. ***Nature Communications***. 2016;7: 1–16.
11. Bondur VG, Zakharova LN, Zakharov AI, et al. Monitoring opolznevykh processov s pomoshh'yu kosmicheskikh interferometricheskikh radarov L-diapazona na primere obrusheniya sklona berega reki Bureya [Monitoring landslide processes by means of L-band radar interferometric observations: using the example of the Bureya river bank caving]. ***Issledovanie Zemli iz kosmosa***. 2019;5: 3–14. (In Russian). DOI:10.31857/S0205-9614201953-14.
12. Cascini L, Fornaro G, Peduto D. Advanced low- and full-resolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales. ***Engineering Geology***. 2010;112: 29–42.
13. Mikhajlyukova PG, Tutubalina OV. Kartografirovanie vulkanicheskikh izverzhenij na osnove radiolokacionnoj interferometrii [Mapping of volcanic eruption based on InSAR]. ***Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.*** 2016;13(2): 153–163. DOI:10.21046/2070-7401-2016-13-2-153-163.
14. Mania R, Walter T, Belousova M, Senyukov S. Deformations and Morphology Changes Associated with the 2016–2017 Eruption Sequence at Bezymianny Volcano, Kamchatka. ***Remote Sensing.*** 2019;11: 1–23. DOI:10.3390/rs11111278.
15. Liu L, Zhang T, Wahr J. InSAR measurements of surface deformation over permafrost on the North Slope of Alaska. ***Journal of Geophysical Research: Earth Surface***. 2010;115(3): 1–14.
16. Baranov YuB, Kantemirov YuI, Kiselevskij EV, et al. Primenenie metoda radiolokacionnoj interferometrii pri markshejderskom kontrole smeshhenij zemnoj poverkhnosti, vyzvannykh razrabotkoj mestorozhdenij nefti i gaza [Application of the radar interferometry in the mine survey control of the surface deformations caused by the development of oil and gas fields]. ***Izvestia Vuzov. Gornyj zhurnal.*** 2008;2: 45–53.
17. Hu B, Chen L, Zou Y, et al. Methods for Monitoring Fast and Large Gradient Subsidence in Coal Mining Areas Using SAR Images: A Review. ***IEEE Access.*** 2019;9: 159018–159035. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3126787.
18. Dagurov PN, Chimitdorzhiev TN, Dmitriev AV, et al. Radiolokacionnaya differencial'naya interferometriya dlya opredeleniya parametrov snezhnogo pokrova [Radar differential interferometry of the L-band for the determination of snow cover parameters]. ***Zhurnal radioe'lektroniki***. 2017;5: 1–22. Available from: http://jre.cplire.ru/jre/may17/1/text.pdf (Accessed 19 April 2024).

19. Sharov A., Nikolskiy D. Semi-controlled interferometric mosaic of the largest European glacier. ***Proceedings of the Envisat Symposium ESA SP-636***. Montreux, 2007; 1–7.
20. Mikhajlyukova PG, Zakharov AI, Zakharova LN. Rajonirovanie Tolbachinskogo Dola na osnove znachenij kogerentnosti [Zoning of the Tolbachinsky Dol based on InSAR coherence]. ***Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.*** 2020;17(2): 85–98. DOI:10.21046/2070-7401-2020-17-2-85-98.
21. Chimitdorzhiev TN, Dmitriev AV, Dagurov PN. Tekhnologiya sovmestnogo analiza vremennykh ryadov izobrazhenij interferometricheskoj kogerentnosti Sentinel-1 i vegetacionnogo indeksa po dannym Sentinel-2 dlya monitoringa sel'skokhozyajstvennykh polej [Technology of joint analysis of Sentinel-1 interferometric coherence time series and vegetation index based on Sentinel-2 data for monitoring agricultural fields]. ***Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.*** 2020;17(4): 61–72. DOI:10.21046/2070-7401-2020-17-4-61-72.
22. Rabus B, When H, Nolan M. The Importance of Soil Moisture and Soil Structure for InSAR Phase and Backscatter, as Determined by FDTD Modeling. ***IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.*** 2010;48(5): 2421–2429. DOI:10.1109/TGRS.2009.2039353.
23. Zwieback S, Hensley S, Hajnsek I. Assessment of soil moisture effects on L-band radar interferometry. Remote Sensing of Environment. 2015;164: 77–89. DOI:10.1016/j.rse.2015.04.012.
24. Dostovalov MYu, Troshko KA. E'ksperimental'naya ocenka kogerentnosti po amplitudnym izobrazheniyam radiolokatora s sintezirovannoj aperturoj Sentinel-1 [An experimental estimation of coherence using magnitude Sentinel-1 synthetic aperture radar images]. ***Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa***. 2020;17(2): 9–18. DOI:10.21046/2070-7401-2020-17-2-9-18.
25. Shirshova VYu, Baldina EA. Primenenie mul'tivremennogo kompozita s kogerentnost'yu (MTS) dlya izucheniya sezonnoj izmenchivosti poverkhnosti o. Vize v celyakh ego kartografirovaniya [The seasonal changes investigation of Vize Island surface for the mapping purposes using a multi-temporal coherence composite (MTC)]. ***Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.*** 2021;18(4): 79–91. DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-4-79-91.
26. Shirshova VYu, Baldina EA, Lebedeva EV. Opyt primeneniya metoda differencial'noj interferometrii dlya opredeleniya smeshhenij zemnoj poverkhnosti v Uzon-Gejzernoj vulkano-tektonicheskoj depressii po dannym Sentinel-1A za 2017–2022 gody [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]. ***Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.*** 2023;20(4): 133–146. DOI:10.21046/2070-7401-2023-20-4-133-146.
27. Moroz YyF, Karpov GA, Moroz TA, et al. Geoelektricheskaya model' kal'dery Uzon na Kamchatke [A geoelectric model for the Uzon Caldera, Kamchatka]. ***Vulkanologiya i sejsmologiya***. 2014;5: 38–51. (In Russian). DOI:10.7868/S020303061405006X.
28. Lebedeva EV, Sugrobov VM, Chizhova VP, et al. Dolina r. Gejzernoj (Kamchatka): gidrotermal'naya deyatel'nost' i osobennosti rel'efoobrazovaniya [The Valley of the River Geyzernaya (Kamchatka): Hydrothermal Activity and Features of Relief Forming]. ***Geomorfologiya***. 2020;2: 60–73. (In Russian). DOI:10.31857/S0435428120020066.
29. Kugaenko JuA, Saltykov VA, Gorbatikov AV, et al. Razvitie modeli rajona Uzon-Gejzernoj vulkano-tektonicheskoj depressii i vulkana Kihpinych (Kamchatka) po rezul'tatam sovmestnogo analiza dannyh mikrosejsmicheskogo zondirovanija i lokal'noj geodinamicheskoj aktivnosti [The model of the Uzon-Geizernaya volcano-tectonic depression and Kikhpinych volcano, Kamchatka, from the joint analysis of microseismic sounding data and local geodynamic activity]. ***Fizika Zemli.*** 2015;3: 89–101. (In Russian). DOI:10.7868/S0002333715030096.
30. Lundgren P, Lu Z. Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations. ***Geophysical Research Letters***. 2006;33(6): 1–4. DOI:10.1029/2005GL025181.
31. Leonov VL. Geologicheskie predposylki i vozmozhnost' prognoza opolznya, proizoshedshego 3 iyunya 2007 g. v Doline Gejzerov, Kamchatka [Geological background and possibility of predicting the landslide that occurred on June 3, 2007. in the Valley of Geysers, Kamchatka]. ***Geofizicheskij monitoring i problemy sejsmicheskoj bezopasnosti Dal'nego***

Vostoka Rossii: trudy regional'noj nauchno-tekhnicheskoj konferencii. In 2 vols. Petropavlovsk-Kamchatskij: GS RAN; 2008;1: 91–95. (In Russian).

32. Lebedeva EV, Baldina EA, Medvedev AA. Sklonovye processy v doline r. Gejzernoj (Kamchatka): rezul'taty deshifrirovaniya raznovremennykh kosmicheskikh snimkov vysokogo prostranstvennogo razresheniya [Use of multi-temporal high resolution space images to analyze the slope processes in the Geysernaya river valley (Kamchatka)]. *Geomorfologiya.* 2022; 53(4): 3–16. (In Russian). DOI:10.31857/S0435428122040095.
33. Dvigalo VN, Melekescev IV. Geologo-geomorfologicheskie posledstviya katastroficheskikh obval'nykh i obval'no-opolznevykh processov v Kamchatskoj Doline Gejzerov (po dannym ae'rofotogrammetrii) [The Geological and Geomorphic Impact of Catastrophic Landslides in the Geyser Valley, Kamchatka: Air-Borne Photogrammetry]. *Vulkanologiya i sejsmologiya*. 2009;5: 24–37. (In Russian).

AUTHORS

Mikhail A. Shiryaev
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Cartography and geoinformatics department, Geography faculty
0009-0004-7481-7483

Elena A. Baldina
baldina@geogr.msu.ru
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Cartography and geoinformatics department, Geography faculty
PhD in Geography, Associate Professor
0000-0001-8231-3403

Irina K. Lurie
lurie@mail.ru
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Cartography and geoinformatics department, Geography faculty
Dr. Sci. (Geography), Professor

Submitted: April 20, 2024. Accepted: June 21, 2024. Published: June 28, 2024.