

Некоторые результаты изучения вулканических и сейсмических процессов на Камчатке методами радарной спутниковой интерферометрии

Киселева Е.А., Михайлов В.О., Тимофеева В.А., Дмитриев П.Н.
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

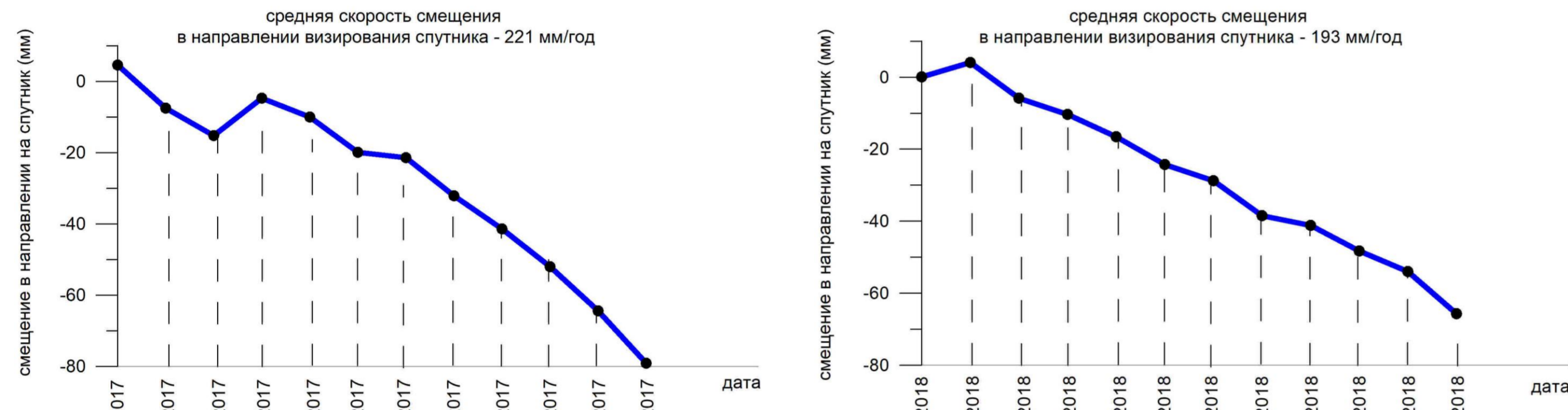
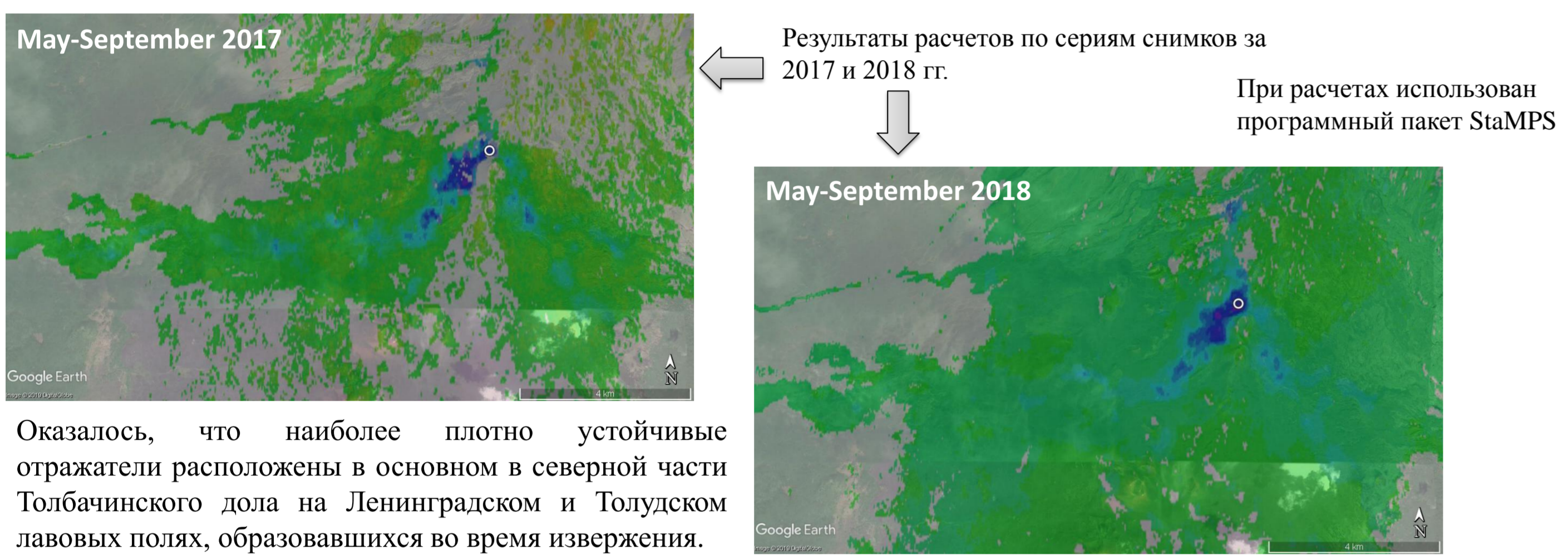


Использование космических снимков, выполненных с применением радаров с синтезированной апертурой (SAR), позволяет определять смещения земной поверхности, произошедшие за время между съемками. Это дает возможность исследования активных геодинамических процессов, в том числе связанных с вулканизмом и землетрясениями. Эффективность спутниковой интерферометрии во многом зависит от природных условий. В частности, горный рельеф, наличие густой растительности или заболочивания летом, мощный снежный покров существенно снижают когерентность радарных снимков и требуют применения специальных подходов для оценки смещений земной поверхности. Именно таким сложным регионом с точки зрения использования методов радарной спутниковой интерферометрии является Камчатка. Несмотря на высокую сейсмическую и вулканическую активность данного региона, до настоящего времени удалось оценить поля смещений земной поверхности лишь для немногих вулканических и сейсмических событий, в основном тех, которые характеризовались большими смещениями. В этих случаях применялись методы дифференциальной радарной интерферометрии, основанные на анализе двух радарных изображений (например, [Lundgren, P., et al., 2006, 2015; Ji L. et al., 2013, 2018; Михайлов и др., 2018]).

Новые перспективы связаны с запуском спутников Sentinel-1A/B, которые осуществляют регулярную съемку территории Камчатки с интервалом от 6 дней. Представлены результаты для различных районов Камчатки с применением анализа пар снимков, а также более сложных подходов – методов устойчивых и распределенных отражателей. Расчеты проводились в программных пакетах SNAP и ENVI SARscape. В частности, для Южно-Озерновского землетрясения 29.03.2017 г. представлена модель поверхности разрыва и результаты оценки поля косейсмических смещений в прибрежном районе залива Озерной.

Метод малых базовых линий (SBAS) на совместном анализе серий радарных снимков, что позволяет фиксировать медленные устойчивые по времени смещения и оценивать средние скорости смещений с точностью до нескольких мм/год. С применением этого метода проанализированы летние серии снимков со спутника Sentinel-1A 2017 и 2018 гг. Получены средние скорости и временные серии смещений в направлении видения спутника на лавовых потоках вулкана Толбачик и на склонах вулканов Большая и Малая Удина, рядом с которыми в последние годы фиксируется повышенная сейсмическая активность.

Извержение вулкана Плоский Толбачик 2012-2013 гг. Метод малых базовых линий (SBAS)



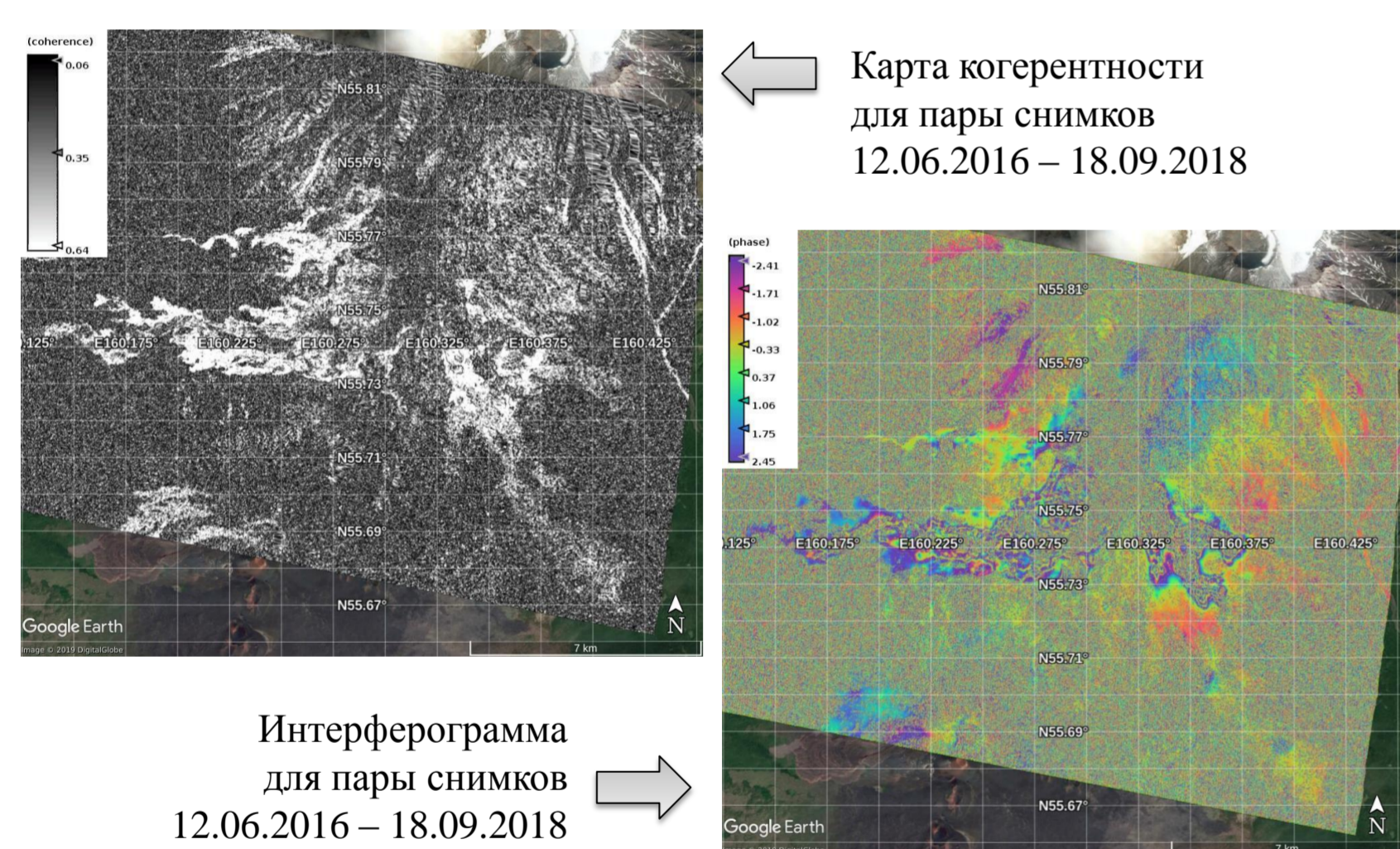
За каждый из рассматриваемых периодов суммарное смещение в проекции на линию визирования спутника составило около 80 мм.

Скачок на временной серии за 2017 год возможно связан с извержением вулкана Безымянный 16 июня 2017 г. Далее с помощью метода DInSAR была предпринята попытка определить суммарное смещение за 2 рассматриваемых года (с 2016 по 2018).

Метод дифференциальной PCA интерферометрии (DInSAR)

Был проведен анализ парных интерферограмм для оценки суммарных смещений за период весна 2016 г. – осень 2018 г., выявлены пары снимков с наилучшей когерентностью (из рассмотренных наилучшую когерентность имеет пара снимков 12.06.2016 – 18.09.2018 г.).

Анализ проводился с помощью программных пакетов SNAP & SNAPHU, цифровая модель рельефа – SRTM3, точные орбиты загружены с https://qc.sentinel1.eo.esa.int/aux_poeorb/.



К сожалению, в тех областях, где были выявлены наибольшие смещения по методу SBAS, наблюдается плохая когерентность, что не позволило определить суммарное смещение.

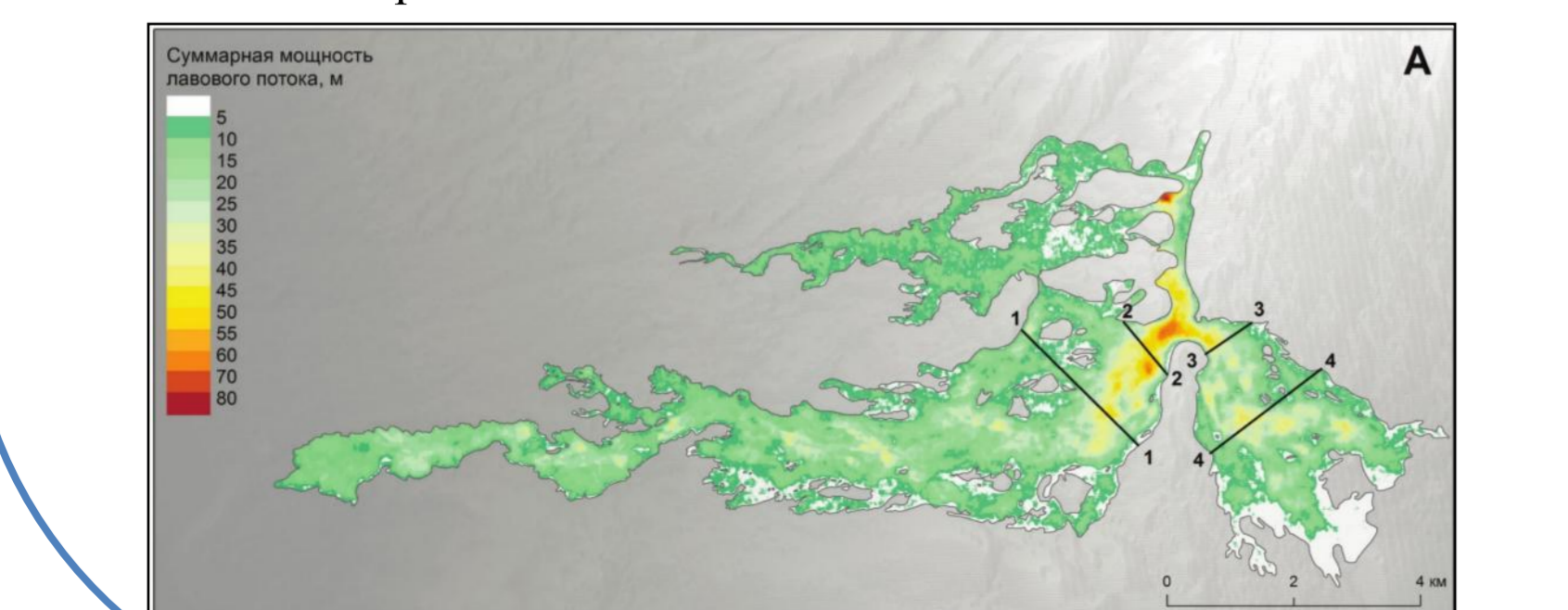
Исследование будет продолжено с использованием других пар снимков, в том числе выполненных в более поздний период.

Предполагаем, что на лавовом поле смещения, возможно, связаны с термическим погружением при его остывании

- выполнена постановка термической задачи с учетом скрытой теплоты фазового перехода
- разработана численная схема ее решения
- после сопоставления расчетных и реальных данных будет сделано заключение о роли термического погружения в наблюдаемых смещениях

При этом, полученные нами результаты по методу распределенных отражателей (SBAS) хорошо коррелируют с результатами наших коллег из МГУ, которые применили метод, основанный на сравнении цифровых моделей рельефа. Этот метод менее точен, но хорошо работает когда смещения очень большие. Наши области наибольших смещений совпадают с областями, в которых по данным [7] суммарная мощность лавового потока составляет от 50 до 80 м.

Наибольшее смещение (в проекции на линию визирования спутника) со 2 мая по 19 октября 2017 г. составило 115 мм.



* (рисунок из статьи [7])

Южно-Озерновское землетрясение 29 марта 2017 г. Метод дифференциальной PCA интерферометрии (DInSAR)

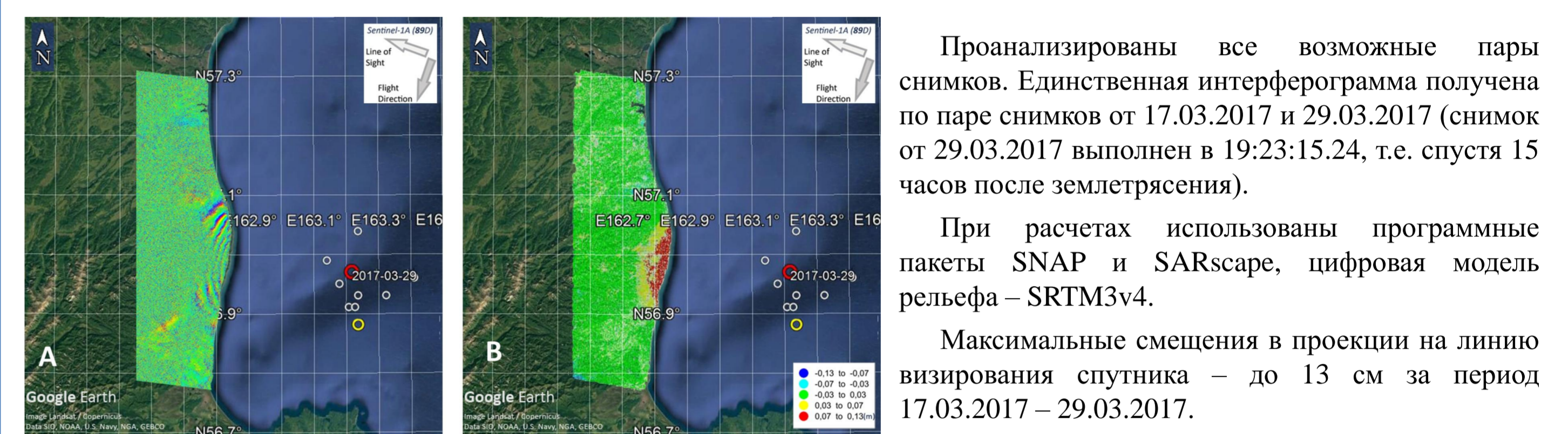
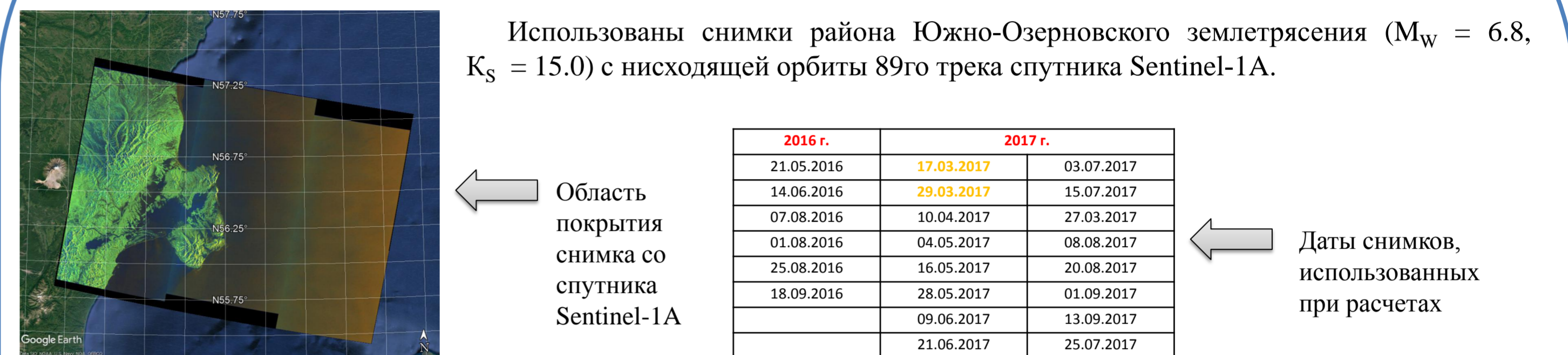


Рис. А. Дифференциальная интерферограмма (в радианах). Полный цветовой цикл от синего до красного на рис. А соответствует смещению на 2.8 см (половина длины волны).

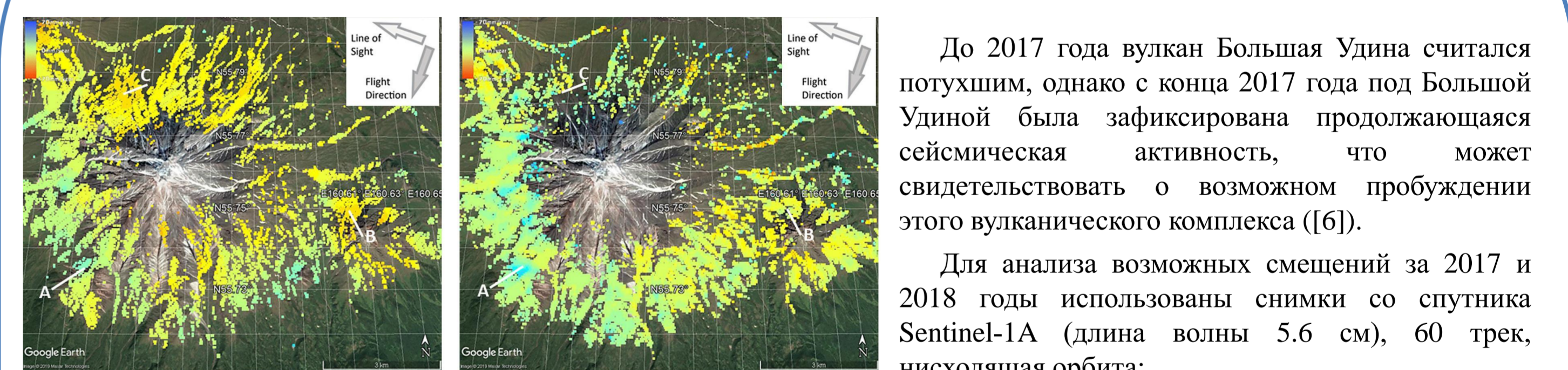
Рис. В. Смещения после развертки (в метрах). Смещения красного цвета положительны (направлены к спутнику), синего (голубого) – отрицательны (направлены от спутника).

- Также показаны:
- эпицентр землетрясения 29.03.2017 04:09:22.2 ($M_w = 6.8$, $K_S = 15.0$) (красное кольцо),
 - эпицентр афтершока 29.03.2017 05:27:45.6 ($M_w = 5.5$, $K_S = 12.5$) (желтое кольцо),
 - эпицентры всех афтершоков, произошедших до 19:23 29.03.2017 (момент съемки снимка) и имеющих энергетический класс (K_S) более 10.

Использованы данные Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН, Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 г. – наст. вр.), <http://sdix.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>.

Проблема интерпретации: в рассматриваемой области в данное время года возможно наличие значительного снежного покрова, не обязательно сухого. При наличии данных геодезии можно будет построить модель поверхности разрыва и сделать вывод о том, являются ли эти смещения смещениями поверхности.

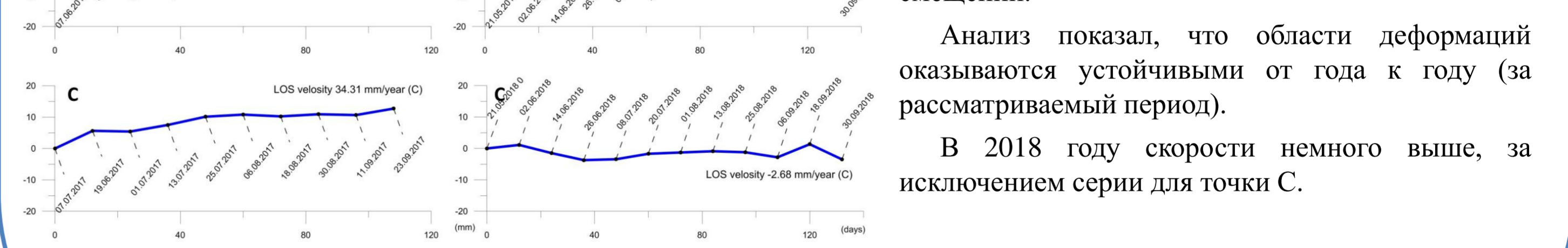
Мониторинг вулкана Большая Удина Метод устойчивых отражателей (PS)



Устойчивые отражатели обнаружены, в основном, на нижнем ярусе вулкана Большая Удина. Мы выделили устойчивые отражатели А, В, С и проанализировали для них временные серии смещений.

Анализ показал, что области деформаций оказываются устойчивыми от года к году (за рассматриваемый период).

В 2018 году скорости смещений немного выше, за исключением серии для точки С.



Литература:

1. Михайлов В.О., Киселева Е.А., Арора К., Тимошкина Е.П., Смирнов В.Б., Чадла П., Пономарев А.В., Шринагед Д. Новые данные об Олоторском землетрясении, полученные с применением спутниковой радарной интерферометрии // Вулканология и сейсмология. 2018. № 3. С. 64–69
2. Ji L., Lu Z., Dzurisin D., Senyukov S. Pre-eruption deformation caused by dike intrusion beneath Kizimen volcano, Kamchatka, Russia, observed by InSAR // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. Vol. 256. P. 87–95
3. Ji L., Izbekov P., Senyukov S., Lu Z. Deformation patterns, magma supply, and magma storage at Karymsky Volcanic Center, Kamchatka, Russia, 2000–2010, revealed by InSAR // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2018. Vol. 352. P. 106–116
4. Lundgren P., Lu Z. Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations // GRL. 2006. Vol. 33. L06301. doi:10.1029/2005GL025181
5. Lundgren P., Kiryukhin A., Milillo P., Samsonov S. Dike model for the 2012–2013 Tolbachik eruption constrained by satellite radar interferometry observations // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. Vol. 307. P. 79–88. doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.05.011
6. Koulikov I. et al. Unrest of the Uda volcano in Kamchatka inferred from the analysis of seismicity and seismic tomography // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2019. Vol. 379. P. 45–59
7. Михайлюкова П.Г., Тутубалина О.В. Картографирование вулканических извержений на основе радиолокационной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. No 2. С. 153–163

- Учитывая сложные для интерферометрии условия (горный рельеф, растительность, снег), получить оценки полей смещений удастся далеко не всегда. Этим объясняется относительно небольшое количество работ для столь активного района.
- Необходимо совершенствование методик, эффективно устраняющих помехи и артефакты. Нами в рамках Мегагранта разрабатываются новые методы определения устойчивых отражателей на природных объектах с низкой отражательной способностью. Один из методов успешно прошел тестирование и будет в ближайшее время применен для анализа снимков Камчатки.
- Для надежной интерпретации необходим комплексный подход, основанный на совместном численном анализе всех имеющихся спутниковых и наземных данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Мегагранта Минобрнауки РФ 14.W03.31.0033 «Геофизические исследования, мониторинг и прогноз развития катастрофических геодинамических процессов на Дальнем Востоке РФ» и гранта РФФИ № 19-35-90092 «Исследование сейсмических и вулканических процессов на основе комплексной геодинамической интерпретации спутниковых и наземных данных».

Снимки со спутника Sentinel-1A (89 трек, 2016 и 2017 гг.) получены из каталога ASF DAAC в июне 2019 г.