

## Количественная оценка параметров Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС ДВО РАН и динамики вулканогенного рельефа на основе данных дистанционного зондирования

П.Г. Михайлюкова<sup>1</sup>, О.В. Тутубалина<sup>1</sup>, Д.В. Мельников<sup>2</sup>, Е.А. Зеленин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия  
E-mails: polinam\_20@mail.ru, olgatut@mail.ru

<sup>2</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия  
E-mail: dvmivs@gmail.com

<sup>3</sup>Геологический институт РАН, Москва, Россия  
E-mail: egorzelenin@mail.ru

Статья представляет результаты исследования Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС ДВО РАН (ТТИ-50) 2012-2013 гг. по данным дистанционного зондирования.

Нами оценены количественные характеристики ТТИ-50: величины вертикальных смещений, площадь лавовых полей, их мощность и объем. Значения вертикальных смещений оценивались по серии радиоинтерферометрических пар для зоны извержения. Пары снимков соответствуют заключительной фазе извержения, когда величины смещения были небольшими. Вертикальные смещения рассчитаны для участков лавовых полей, значение когерентности которых превышает 0,4. Полученная серия значений вертикальных смещений отражает преимущественно процесс остывания лавы, для которого характерны просадки поверхности. Максимальные величины смещений составили 27 см за 24 дня.

Вычисление мощности лавовых полей выполнялось на основе анализа разновременных ЦМР. Высотные профили, измеренные геодезическими приемниками GPS в ходе полевых работ в августе 2013 года, были использованы для оценки точности ЦМР: общедоступных SRTM, SRTM-X, ASTER GDEM и ЦМР, построенной ИТЦ СКАНЭКС по двум оптическим стереопарам SPOT 6 (от 18.07.2013 и 11.10.2013). Среднеквадратическая погрешность определения абсолютных высот по ЦМР SRTM-X и SPOT6, по сравнению с данными наземных съемок, не превышает 5 м. Это делает возможным оценку мощности лавовых потоков по разности высот SRTM-X и SPOT6. ЦМР SPOT6 за две даты использовались совместно для исключения ошибок, связанных с облачностью и свежеснегавшим снегом. Максимальные значения мощности превышают 80 м. Вычисленный объем извержения -  $0,521 \pm 0,25 \text{ км}^3$ .

**Ключевые слова:** интерферометрия, вертикальные смещения, ЦМР, ТТИ-50.

### Введение

Трещинное Толбачинское извержение им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ТТИ-50) началось 27 ноября 2012 г. и длилось почти год (Гордеев и др., 2013; Двигало и др., 2014). В результате извержения образовалось три лавовых потока – Водопадное, Ленинградское, Толудское, разной протяженности и объема (рис. 1). Быстрое развитие извержения и его опасность обусловили необходимость использования данных дистанционного зондирования для оценки динамики и количественных параметров ТТИ-50.

В последние месяцы извержения выполнялась регулярная космическая съемка оптическими и радиолокационными съемочными системами (SPOT-6, Radarsat-2). Целью работы является количественная оценка ТТИ-50 на основе полученных данных дистанционного зондирования. Это предполагает решение следующих задач:

1. определение площади извержения по космическим снимкам оптического диапазона;
2. определение объема извержения с использованием цифровых моделей рельефа (ЦМР), составленных по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), и полевых геодезических измерений;
3. определение вертикальных смещений рельефа методом двухпроходной дифференциальной интерферометрии;
4. картографирование динамики рельефа в процессе извержения.



*Рис. 1. Лавовые потоки ТТИ-50*

В то время как первые две задачи решаются по хорошо известным методикам (дешифрирование космических снимков в оптическом диапазоне, использование разновременных цифровых моделей рельефа), вопросы применения радиолокационной интерферометрии для исследования малоамплитудных изменений рельефа в пересеченной местности все еще требуют углубленной разработки. Достоверность и точность получаемых результатов зависят от качества радиолокационных снимков, точности определения положения съемочной системы на орбите, параметров имеющихся цифровых моделей рельефа, состояния местности в момент съемки.

Для динамичной и пересеченной местности, где нет постоянных по высоте реперов для нормализации результатов, высокоточное исследование динамики рельефа является нетривиальной задачей. Поэтому при выполнении исследования было необходимо разработать методику интерферометрической обработки снимков Radarsat-2 для исследования

динамики вулканогенного рельефа, оценить точность и достоверность результатов и определяющие их факторы.

### Методика исследования

*Оценка площади* извержения выполнялась на основе дешифрирования границ лавовых полей по космическим снимкам оптического диапазона, полученных съемочными системами спутников SPOT 6 и Landsat 8. По июльскому снимку SPOT 6 NAOMI (18 июля 2013 г.) была отдешифрирована граница Водопадного и Ленинградского лавовых полей. Положение кромки Толудского лавового поля было определено на основе космического снимка Landsat 8 OLI от 9 сентября 2013 г.

*Определение объема извержения* выполнялось на основе разницы значений абсолютных высот двух ЦМР. Поскольку точной модели рельефа до извержения у нас не имелось, то первоначально необходимо было оценить общедоступные ЦМР с точки зрения пригодности для сопоставления с цифровой моделью рельефа, построенной по оптическим стереопарам SPOT 6 на даты после завершения извержения. С этой целью были проанализированы три ЦМР, находящихся в открытом доступе – SRTM, SRTM-X, ASTER GDEM. Их сравнительная характеристика приведена в *табл. 1*.

Таблица 1. Характеристика используемых ЦМР

	<i>SRTM</i>	<i>SRTM-X</i>	<i>ASTER GDEM ver2</i>	<i>SPOT 6</i>
Метод построения	Интерферометрия	Интерферометрия	Стереомоделирование	Стереомоделирование
Пространственное разрешение, м	90	30	30	1,5
Горизонтальная точность, м	15	20	30	2,5
Вертикальная точность, м	16	16	20	3

Цифровая модель рельефа Толбачинского Дола после извержения была построена по снимкам SPOT 6 на основе стереопар от 18 июля и 11 октября 2013 г. На стереопаре от 18 июля южная часть Водопадного лавового поля покрыта облачностью. Толудское лавовое поле в июле и августе 2013 г. еще продолжало формироваться. В связи с этим на перечисленные участки ЦМР была построена на основе стереопары SPOT 6 от 11 октября 2013 г. Поскольку на стереопаре от 11 октября территория покрыта снегом, то для уменьшения ошибки моделирования было решено ее не использовать для построения ЦМР на те лавовые поля, которые летом 2013 г. были уже неактивны (Водопадное, Ленинградское).

Статистическая оценка значений абсолютных высот всех ЦМР была выполнена с привлечением результатов геодезических измерений, выполненных во время совместных полевых работ географического факультета МГУ и ИВиС ДВО РАН. Авторы принимали непосредственное участие в планировании работ, выборе опорных точек и мест профилирования, а также в обработке результатов измерений.

Опорными точками являлись вершины шлаковых конусов, их характерные морфологические участки и другие особенности рельефа местности. Точность плановых координат точек составила 14 см, точность по высоте – 23 см.

Для оценки точности распределения высот на ЦМР были измерены два высотных профиля в районе конуса Клешня и сопки Кругленькая (*рис. 1*). Шаг профиля AA<sub>1</sub> составил 100 м на равнинных участках и 150 м при измерениях лавового потока. Профиль BB<sub>1</sub> прокладывался с шагом 150 м. В обоих случаях также измерялись характерные точки рельефа.

Значения *вертикальных смещений* лавовых потоков были получены в результате интерферометрической обработки радиолокационных снимков. На основе серии радиолокационных снимков Radarsat-2, полученных в период с июня по октябрь 2013 г., выполнен расчет значений вертикальных смещений лавовых потоков методом дифференциальной двухпроходной интерферометрии.

На предварительном этапе интерферометрической обработки была оценена пригодность полученных пар изображений для вычисления вертикальных смещений. Для этого были рассчитаны величины базовой линии для всех комбинаций снимков. Величина базовой линии интерферометрических пар, используемых в работе, не превышала 70 м.

Период съемки Radarsat-2 – 24 дня – позволяет избежать существенной временной декорреляции вследствие изменения состояния местности. К тому же территория практически лишена растительного покрова, что исключает серьезные изменения на местности в связи с фенологической динамикой.

На качество результатов интерферометрической обработки оказывает влияние большое количество факторов (Верба и др., 2010). На текущем этапе работы было проанализировано влияние информации о положении орбиты КА в пространстве. Было установлено, что без включения дополнительной информации о точном положении КА в момент съемки в интерферометрическую обработку, в конечных значениях вертикальных смещений возникает большая систематическая ошибка, называемая в литературе «орбитальный сдвиг» (Samsonov et al., 2011). Для устранения орбитального сдвига в обработку включаются файлы положения орбиты спутника во время съемки и большое количество наземных опорных точек.

Вертикальные смещения были рассчитаны для областей, значение когерентности которых превышало 0,4. Поскольку в рассматриваемый период (июнь-октябрь 2013 г.) Толудское лавовое поле только формировалось, то для его значительной области произошла потеря когерентности вследствие растрескивания лав. Такие участки были исключены из обработки. Для двух других лавовых полей значение когерентности практически для всех участков превышает 0,4.

### Результаты исследования и их обсуждение

Общая измеренная площадь лавовых потоков составила 35,95 км<sup>2</sup>. Площади отдельных лавовых потоков приведены в *табл. 2*.

Таблица 2. Площадь лавовых потоков, измеренная по снимкам SPOT 6 NAOMI и Landsat 8 OLI

<i>Название лавового поля</i>	<i>Площадь, км<sup>2</sup></i>
Ленинградское	21,6
Толудское	8,1
Водопадное	6,2

Статистическая оценка имеющихся ЦМР на основе измеренных в поле точек показала, что среднеквадратическая ошибка определения абсолютных высот по ЦМР SRTM-X и SPOT 6 не превышает 5 м для относительно равнинных участков, в то время как для SRTM, ASTER GDEM она существенно больше – 10 м. На *рис. 2* представлены графики высот местности, построенные по результатам GPS измерений и анализируемым ЦМР. Максимальная величина ошибки характерна для тех точек, которые расположены на вершинах шлаковых конусов или у их подножия. Это связано с несколькими факторами.

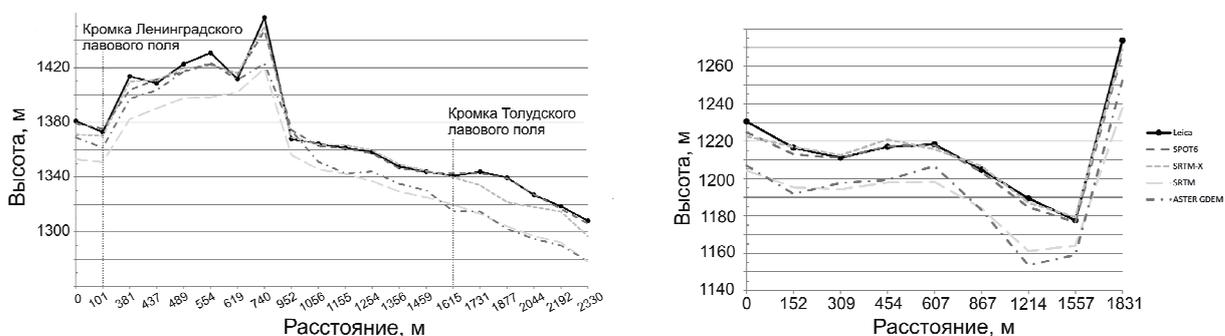


Рис. 2. Высотные профили, построенные по результатам геодезических измерений и ЦМР

Цифровые модели рельефа SRTM и SRTM-X получены в результате интерферометрической обработки радиолокационных снимков. Наклонная радиолокационная съемка обуславливает существенные геометрические искажения снимков, особенно на территории горных районов. К тому же недостаточно высокое пространственное разрешение ЦМР (30-90 м) обуславливает существенное усреднение высот в пределах пиксела. Отметим, что перед оценкой точности высот для SRTM-X была проведена фильтрация низкочастотным фильтром с размером окна 3 для сглаживания резких выбросов значений высот.

В процессе создания ЦМР ASTER GDEM выполнялось неоднократное усреднение и фильтрация промежуточных результатов стереомоделирования. В совокупности с невысоким для ЦМР пространственным разрешением – 30 м – это приводит к ошибкам в значениях высот пикселов.

Полученное значение среднеквадратической погрешности для ЦМР SPOT6 и SRTM-X позволяет вычислить оценочную мощность лавовых потоков на основе разницы абсолютных высот двух ЦМР. Максимальные значения мощности отмечены в районе конуса Клешня и по нашим расчетам немногим превышают 80 м. Средняя мощность потоков составила 13 м. Результаты расчета мощности лавовых потоков ТТИ-50 были использованы для вычисления объема лавы, величина которого составила  $0,521 \text{ км}^3 \pm 0,25 \text{ км}^3$ . Значительная итоговая погрешность вычисленной величины объема лавы обусловлена погрешностями исходных ЦМР и большой площадью распространения лавовых потоков при незначительной средней мощности - 13 м. Полученные значения хорошо согласуются с оценками В.Н.Двигало и др. (2014), полученными по другим материалам.

Полученная серия предварительных карт значений вертикальных смещений (*рис. 3*) отражает процесс остывания лавы, для которого характерны просадки лавовых потоков. Максимальные величины просадок достигают 27 см за 24 дня.

Полученные значения просадок поверхности лав на заключительном этапе извержения могут быть использованы вулканологами для оценки изменения плотности лав при остывании.

Следует отметить, что величины просадок, вероятно, являются заниженными, что связано с пространственным разрешением снимков - 22 м. Это обуславливает осреднение величин вертикальных смещений в пределах пикселов размером 22x22 м. К тому же на данном этапе работы в качестве опорной ЦМР использовалась SRTM, которая является недостаточно детальной для обработки снимков Radarsat-2. Предстоит также учесть влияние атмосферы на результаты оценки вертикальных смещений (предположительно оно невелико, за исключением склонов вулкана Острый Толбачик).

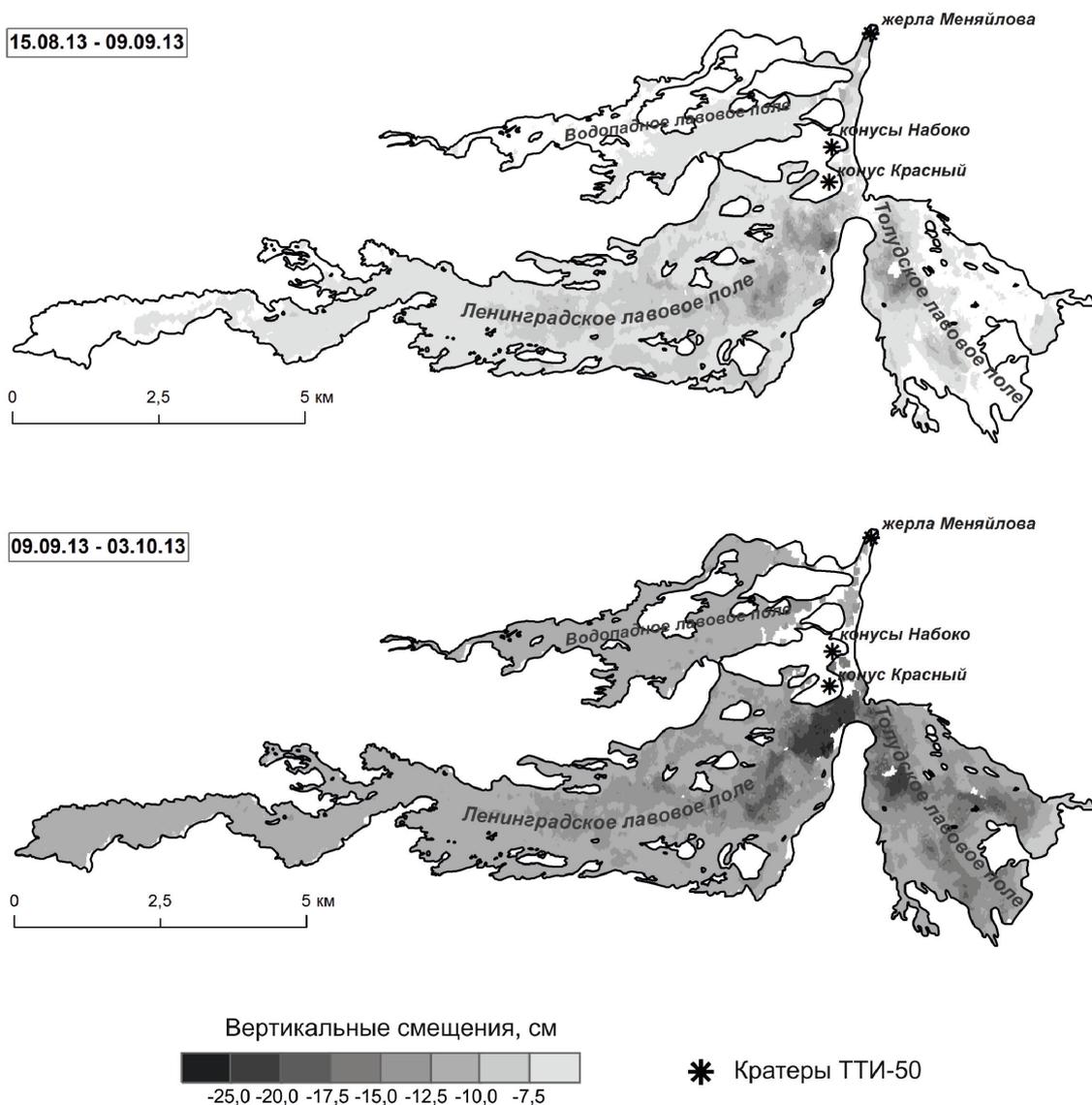


Рис. 3. Вертикальные смещения, полученные методом двухпроходной дифференциальной интерферометрии на основе интерферометрических пар Radarsat-2

### Заключение

В результате исследования на основе данных дистанционного зондирования были оценены величины вертикальных смещений для последних месяцев извержения, определена мощность лавовых потоков и вычислен объем изверженной лавы. Эти результаты имеют существенное значение для вулканологических исследований в районах активных вылканических извержений.

Для совершенствования результатов интерферометрической обработки на следующих этапах исследования планируется решить такие задачи, как:

- определение источников погрешностей в результатах интерферометрической обработки;

- уточнение параметров интерферометрической обработки;
- картографирование динамики рельефа на основе выполненного анализа.

По итогам будущего этапа работ будет окончательно сформулирована методика интерферометрической обработки снимков Radarsat-2, с указанием оптимальных параметров при заказе съемки, требований к дополнительно привлекаемым данным (ЦМР, данным наземных измерений), рекомендуемых параметров при обработке снимков, программного обеспечения.

### Благодарности

Авторы благодарят А.А. Сучилина (кафедра картографии и геоинформатики географического факультета МГУ) за предоставление геодезического оборудования; В.Н.Двигало, М.А.Магуськина и К.М.Магуськина, Ю.В. Демянчука и О.А. Гирину (ИВиС ДВО РАН), А.А. Лукашова (МГУ) за консультации и помощь в полевых исследованиях; М.В. Зиминая, А.Н. Никитского и А.А. Алейникова (ИТЦ СКАНЭКС) за организацию спутниковых съемок и составление ЦМР по снимкам SPOT 6. Предоставление снимков и поддержка полевых исследований осуществлялись в рамках договора 13/0520 от 20 мая 2013 г. между ИТЦ СКАНЭКС и географическим факультетом МГУ. Исследования также частично финансировались проектами РФФИ 12-05-91178-ГФЕН-а, 13-05-12061 офи-м и грантом Президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ НШ-2248.2014.5.

### Литература

1. *Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования/под ред. В.С.Верба. М: Радиотехника, 2010. 680 с.
2. *Гордеев Е.И., Муравьев Я.Д., Самойленко С.Б., Вольнец А.О., Мельников Д.В., Двигало В.Н.* Трещинное Толбачинское извержение в 2012-2013 гг. Первые результаты // Доклады Академии Наук. 2013. Т. 452. № 5. С. 562–566.
3. *Двигало В. Н., Свирид И. Ю., Шевченко А. В.* Аэрофотограмметрические исследования Нового трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 58-62.
4. *Samsonov S., Beavan J., Gonzalez P.J., Tiampo K., Fernandez J.* Ground deformation in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand, observed by ALOS PALSAR interferometry // Geophys. J. Int. No. 187. 2011. P. 147–160.

# Quantitative assessment of the 2012-2013 Tolbachik fissure eruption based on remote sensing

P.G. Mikhaylyukova<sup>1</sup>, O.V. Tutubalina<sup>1</sup>, D.V. Melnikov<sup>2</sup>, E.A. Zelenin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

*E-mail: polinam20@mail.ru*

<sup>2</sup> *Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

*E-mail: dvmivs@gmail.com*

<sup>3</sup> *Geological Institute RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: egorzelenin@mail.ru*

This paper presents results of study of the 2012-2013 Tolbachik fissure eruption on the basis of remote sensing techniques.

We have calculated values of vertical displacements, lava thickness and the volume of the erupted lava. Values of vertical displacements were estimated using a series of radar interferometric pairs for the Tolbachik eruption zone. These pairs correspond to the concluding phase of the eruption, when vertical displacements were relatively small. Vertical displacements were calculated for parts of lava fields with coherence value over 0,4. The obtained values of vertical displacement are typical for subsidence caused by cooling lava flows. The maximum value of subsidence is 27 cm for 24 days.

The calculation of lava thickness was based on comparison of multitemporal DEMs. Height profiles measured by geodetic GPS receivers during fieldwork in August 2013 were used to estimate the quality of DEMs, derived from satellite imagery: freely available SRTM, SRTM-X, ASTER GDEM and the DEMs calculated at RDC ScanEx from two stereopairs of SPOT6 images (of 18.07.2013 and 11.10.2013). The RMS error for heights of SRTM-X and SPOT 6 in relation to GPS data is within  $\pm 5$  m. This enables to estimate the total thickness of new lava fields on the basis of height differences between SRTM-X and SPOT 6 DEMs. Both SPOT 6 DEMs were used together to eliminate errors caused by clouds and snow. The maximum lava thickness is over 80 m. The volume of the erupted lava is  $0,521 \pm 0,25$  km<sup>3</sup>.

**Keywords:** interferometry, vertical displacement, DEM, 2012-2013 Tolbachik fissure eruption.

## References

1. Verba V.S., Neronskii L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Radar system of Earth observation), Moscow: Radiotekhnika, 2010, 680 p.
2. Gordeev E.I., Murav'ev Ya.D., Samoilenko S.B., Volynets A.O., Mel'nikov D.V., Dvigalo V.N. Treshchinnoe Tolbachinskoe izverzhenie v 2012-2013 gg.. Pervye rezul'taty (The 2012-2013 Tolbachik fissure eruption. First Results), *Doklady Akademii Nauk.*, 2013, Vol. 452, No. 5, pp. 562–566.
3. V.N. Dvigalo, I. Yu. Svirid, A. V. Shevchenko Aerofotogrammetricheskie issledovaniya Novogo treshchinogo Tolbachinskogo izverzheniya 2012–2013 gg. (Aerial photogrammetry research of the 2012-2013 Tolbachik fissure eruption), *Vulkanizm i svyazannye s nim protsessy* (Volcanism and related processes), Conf. Proc., Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS FEB RAS, 2014, pp. 58-62.
4. Samsonov S., Beavan J., Gonzalez P.J., Tiampo K., Fernandez J., Ground deformation in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand, observed by ALOS PALSAR interferometry, *Geophys. J. Int.* No.187, 2011, pp. 147–160.