Геостатистическая обработка результатов радарной интерферометрии при решении задач крупномасштабного мониторинга

В. М. Филатова, И. В. Назаров, А. В. Филатов, Л. Ф. Жегалина

Балтийский федеральный университет имени И. Канта Калининград, 236041, Россия E-mail: vifilatova@kantiana.ru

Статья описывает исследование и практическое применение технологии спутниковой радиолокационной интерферометрии для обнаружения деформаций земной поверхности и смещений техногенных объектов на больших территориях. Информация, получаемая на основе обработки радиолокационной съёмки, послужит основой для организации более детального исследования территории с использованием данных дистанционного зондирования и наземных геодезических измерений. В ходе выполнения проекта разработаны система, реализующая полный цикл интеферометрической обработки Sentinel-1А/В, и геопортал для публикации результатов. Суммарно обработаны 210 исходных радиолокационных сцен за 2016-2019 гг. Интерактивная карта Калининградской обл., опубликованная на геопортале, представляет собой точечные измерения среднегодовой скорости смещений техногенных объектов с возможностью отследить историю смещений. Проведённый точечно-зональный анализ динамики скоростей позволил обнаружить на территории Калининградского региона зоны, характеризуемые значительными величинами просадок или разнонаправленной деформацией земной поверхности и требующие повышенного внимания. Одной из выявленных зон с высокой плотностью экстремальных точек — просадок — стал о. Октябрьский. Анализ динамики скоростей смещений показал, что в результате работ по укреплению грунтов достигнуто существенное снижение скоростей просадок, но два из четырёх очагов деформаций сохраняются.

Ключевые слова: радиолокационная интерферометрия, Sentinel-1А/В, геинформационный сервис, деформации земной поверхности, кластерный анализ

Одобрена к печати: 14.05.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-75-82

Введение

В 2014 и 2016 гг. Европейским космическим агентством (ESA — European Space Agency) запущены два радиолокационных спутника среднего пространственного разрешения Sentinel-1A/B, которые уже в течение 6 лет поставляют пользователям изображения земной поверхности вне зависимости от освещённости и погодных условий. В конце 2018 г. общий объём радарных данных достиг 5,13 Пбайт (Copernicus..., 2019). Для любого региона Земли доступны уникальные данные с широким спектром применения, среди которых — мониторинг деформаций. Открылась возможность наблюдать за геодинамикой огромных территорий, и многие исследовательские группы начали публиковать крупномасштабные карты смещений, охватывая территории целых стран. Ниже приведены некоторые примеры.

В работе (Haghighi, Motagh, 2017) выполнена обработка данных на всю территорию Германии. Федеральный институт землеведения и природных ресурсов Германии (*нем*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) опубликовал собственные результаты на территорию страны за период 2014–2018 гг. с использованием своего геопортала (https://bodenbewegungsdienst.bgr.de). Исследователи из Делфтского технического университета, Нидерланды (*англ.* Delft University of Technology) в 2011 г. на основе всех доступных радиолокационных изображений (РЛИ) ERS-1/2 и Envisat 1992–2010 гг. построили обзорную карту скоростей смещений на всю территорию Нидерландов (Cuenca et al., 2011). Компания SatSense опубликовала демонстрационную карту смещений для городов Лондон и Стоук (Великобритания) за 2015–2018 гг. на основе данных Sentinel-1A/В (http://demo.satsense.com). Норвежская

геологическая служба (*норв*. Norges Geologiske Undersøkelse — NGU) подготовила и разместила для свободного доступа карту скоростей смещений для территории Норвегии за период с июня 2015 г. по октябрь 2018 г. (http://insar.ngu.no). Учитывая продолжительность норвежской зимы и глубину снежного покрова, графики смещений, доступные для каждой точки, включают только бесснежные периоды. Примерами коммерческих продуктов являются карты, подготовленные компаниями TRE-Altamira (Великобритания, Италия, Франция, Дания, https://tre-altamira.com/), CGG (Великобритания, https://www.cgg.com/en).

Публикуемые результаты обработки РЛИ представляют собой множество точек измерений, для каждой из которых доступны среднегодовая скорость и история смещений объекта в течение интервала наблюдений. Однако для пользователей геопорталов данная информация не всегда до конца понятна. Целевой аудиторией подобных сервисов и основными потребителями данной информации являются геологи и маркшейдеры из коммерческих и научно-исследовательских организаций. У таких специалистов результаты радарной интерферометрии в виде точек, наложенных на оптический спутниковый снимок, вызывают много вопросов. Например, смещения какого объекта или участка земной поверхности передаёт данная точка измерений? Почему среди скопления стабильных точек возникают отдельные, значительно отличающиеся по цвету? Как на смещение точки измерения влияют изменения самого отражающего объекта, такие как температурное сжатие, расширение. Одним из способов преодоления барьера между результатами интерферометрии и заинтересованными специалистами может стать подготовка ответов на возникающие вопросы с приведением теоретических основ радарной съёмки и метода интерферометрии. Второй подход, который реализован и представлен в данной работе, — это геостатистическая обработка результатов интерферометрии радарных данных, покрывающих большие территории, подготовка и публикация более информативных картосхем на геопортале. Данный подход предусматривает автоматизированное обнаружение зон экстремальных значений деформаций и построение дополнительных растровых слоёв для более детального анализа.

Исходные данные и методы обработки

В работе использованы радиолокационные данные, полученные с пары спутников Sentinel-1A/B. Съёмка земной поверхности радиолокатором Sentinel/SAR выполняется в режиме TOPSAR (Terrain Observation with Progressive Scans SAR), что является более эффективной версией широкополосного режима ScanSAR (De Zan, Guarnieri, 2006). Радиолокатор зондирует участок земной поверхности вдоль линий пролёта космического аппарата тремя парциальными полосами, переключая сканирующий луч. В результате кадр размером 250×250 км состоит из трёх полос по 9–10 парциальных кадров размером $~87 \times 27$ км каждый с некоторым перекрытием. Данные доступны для свободного скачивания на порталах SciHUB (https://scihub.copernicus.eu/) и Alaska Satellite Facility (https://asf.alaska.edu/) в формате SLC (Single-Look Complex), подходящем для интерферометрической обработки. Размер участка земной поверхности, соответствующего пикселу РЛИ, составляет 14 м по азимуту и 4 м по наклонной дальности.

Дополнительно к радиолокационным данным в качестве опорной топографии использована цифровая модель местности (ЦММ) Тапdem-Х 90 m, полученная в результате обработки глобальной радиолокационной съёмки поверхности Земли с пары спутников TerraSAR-X/ Tandem-X (https://geoservice.dlr.de/). На текущий момент Tandem-X 90 m является самой актуальной и доступной информацией о топографии дневной поверхности Земли. Размер элемента разрешения (пикселя) составляет 3 угл. с, что равно 90 м на экваторе. Каждый скачиваемый файл покрывает участок размером 1° широты на 1° долготы (для территории севернее 60-й параллели — 2° долготы).

Спутниковая радиолокационная интерферометрия использует эффект интерференции электромагнитных волн и основана на математической обработке нескольких когерентных амплитудно-фазовых измерений одного и того же участка земной поверхности со сдвигом

в пространстве приёмной антенны при проведении нескольких последовательных съёмок. Для обработки многовременной радиолокационной съёмки Sentinel-1A/B использован метод постоянных интерферометрических отражателей, который является эффективным инструментом для мониторинга деформаций и хорошо описан в научной литературе (Захаров и др., 2012; Ferretti et al., 2001; Hooper, 2006). Процесс обработки можно разделить на 4 этапа:

1. Совмещение исходных РЛИ и построение стека дифференциальных интерферограмм относительно выбранного основного (master) кадра. Интерферограмма получается путём умножения комплексного сигнала, принятого при первом пролёте, на комплексно-сопряжённый к сигналу, принятому при повторном пролёте. Таким образом, фаза интерферограммы является разностью фаз сигналов. Топографическая компонента, возникающая вследствие обзора рельефа отражающей поверхности под двумя разными углами, рассчитывается на основе опорной ЦММ и вычитается из интерферометрической фазы. В результате каждая дифференциальная интерферограмма содержит информацию о деформациях земной поверхности, остаточную топографическую компоненту из-за неточности и неактуальности ЦММ, атмосферные флуктуации электрической длины пути сигнала радара, ошибки расчёта орбиты и шум вследствие декорреляции.

2. Определение точек — кандидатов в постоянные отражатели на основе поэлементной оценки стабильности амплитуды и/или фазы РЛИ. Один из способов — расчёт индекса дисперсии амплитуды как отношения дисперсии к среднему значению амплитуды отражения сигнала от одного и того же объекта или участка поверхности на основе всего набора РЛИ.

3. Удаление из фазы выбранных точек остаточной топографической компоненты с целью уменьшения частоты фазовых переходов через 2π. Выполняют разворот фазы для раскрытия 2π-неоднозначности. После чего удалённую компоненту возвращают обратно.

4. Моделирование и разделение компонент развёрнутой дифференциальной интерферометрической фазы в зависимости от их свойств. Так, топографическая компонента пропорциональна перпендикулярной базовой линии, деформационная зависит от временного интервала между съёмками (временная база). Ошибка расчёта орбиты аппроксимируется для каждой интерферограммы полиномом первой степени от двух переменных: координат точки по азимуту и наклонной дальности. Атмосферная компонента — это медленно меняющийся сигнал, который удаляется при помощи низкочастотного фильтра, применяемого к интерферометрической фазе после вычитания топографии, линейных деформаций и орбитальных ошибок. Оставшийся высокочастотный сигнал содержит нелинейные деформации и фазовый шум. Складывают данный остаток с линейной деформационной компонентой и получают результирующую историю смещений для каждого постоянного отражателя. Оценкой качества по аналогии с классической дифференциальной интерферометрией является когерентность в интервале от 0 до 1 в соответствии со следующей формурой (Hooper, 2006):

$$\gamma_{x} = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^{N} \exp\left\{ j \left(\Phi_{x,i} - \hat{\Phi}_{\varepsilon,x,i} - \hat{\Phi}_{def,x,i} - \hat{\Phi}_{orb,x,i} - \hat{\Phi}_{atm,x,i} \right) \right\} \right|,$$

где *х* — индекс точки; *i* — индекс интерфрограммы от 1 до *N*; $\Phi_{x,i}$ — фаза исходной дифференциальной интерферограммы; $\hat{\Phi}_{\varepsilon,x,i}$, $\hat{\Phi}_{def,x,i}$, $\hat{\Phi}_{orb,x,i}$, $\hat{\Phi}_{atm,x,i}$ — расчётные значения топографической ошибки, линейной деформации, неточности орбиты и атмосферного сдвига соответственно; *j* — мнимая единица.

Дополнительно для каждой точки рассчитана оценка точности как наименьшее значение среднеквадратичной ошибки аппроксимации смещений полиномом 1-й, 2-й или 3-й степени.

$$E_{x} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left(D_{x,i} - \hat{D}_{x,i} \right)^{2}},$$

где D — смещение в миллиметрах; \hat{D} — аппроксимированное значение.

Для пост-обработки результатов, состоящих из более 6 млн точек, распределённых по большой территории, необходим эффективный и унифицированный подход, чтобы отфильтровать ненадёжные. Целью крупномасштабного мониторинга является построение обзорной карты с возможностью обнаружения зон с просадками или поднятиями, которые плавно замедляются, ускоряются или развиваются с постоянной скоростью. Более сложные нелинейные деформации требуют индивидуального подхода: анализа причин возникновения и соответствующей настройки параметров обработки. Мы делаем предположение, что смещения стабильных отражающих объектов должны с допустимым уровнем погрешности передавать искомые плавные деформации поверхности. Ошибка аппроксимации измеряется в миллиметрах и даёт пользователю представление, насколько точно смещения точки соответствуют принятой модели, описывающей предполагаемые деформации. Результирующее множество стабильных отражателей можно сформировать, задавая менее строгое отсечение по когерентности, но убирая точки со значениями ошибки аппроксимации выше порога, определяемого на основе анализа всего распределения. Это позволяет удалить нестабильные отражатели и сохранить те, которые содержат информацию о нелинейных деформациях.

Результаты

Калининградская обл. — самый западный регион России, занимающий площадь более 15 тыс. км². Максимальная протяжённость области с запада на восток — 205 км, с севера на юг — 108 км. Благодаря европейскому расположению региона его съёмка выполняется с двух спутников Sentinel-1А/В с периодичностью 6 сут. Для примера, съёмка регионов Сибири выполняется одним спутником Sentinel-1В с периодичностью только 12 сут. В обработке использованы РЛИ, полученные с восходящей орбиты (движение спутника с юга на север) № 26. Для покрытия всей территории области использованы 14 парциальных кадров в режиме TOPSAR Interferometric Wide.

Обработка данных многопроходной радиолокационной съёмки по методу постоянных отражателей выполнена с использованием программного обеспечения FInSAR, написанного на языке C/C++ (Филатов, 2017). Для представления результатов разработан геоинформационный сервис, реализованный на базе доступного программного обеспечения GeoServer, которое, получая на входе файл в формате ESRI ShapeFile, формирует растровые тайлы, загружаемые клиентской программой на стороне пользователя. Таким образом, взаимодействие с интерактивной картой осуществляется через обычный веб-браузер (*puc. 1*). Интерфейс пользователя реализован на языке JavaScript с использованием библиотеки Leaflet.



Рис. 1. Интерактивная карта смещений Калининградской обл., отображающая среднегодовые скорости смещений стабильных отражающих объектов за 2018–2019 гг.

В качестве фона применяются оптические снимки, загружаемые с геоинформационного сервиса Яндекс Карты. Асинхронные запросы к GeoServer для получения описаний векторных и растровых слоёв, а также данных для построения графиков реализованы через AJAX-технологии.

Всего проведено два цикла обработки данных многопроходной съёмки на Калининградскую обл.: 152 РЛИ за период 06.01.2016–27.12.2018 и 120 РЛИ за период 01.01.2018–16.12.2019. Таким образом, полученные результаты имеют общий временной интервал длительностью в один год, или 62 РЛИ. Будущее обновление результатов планируется выполнять в соответствии с данной стратегией, обрабатывая новые объёмы РЛИ за двухгодичный период, включая один перекрывающийся год. Иначе увеличение интервала наблюдений приведёт к уменьшению плотности точек, так как меньшее количество отражателей остаются стабильными в течение большего времени и исключаются из дальнейшего процесса. Кроме того, хранение и обработка всего объёма исходных данных требует значительных дисковых и вычислительных ресурсов. Каждая съёмка состоит из двух кадров по 7,5 Гбайт каждый; таким образом, для двухлетнего интервала наблюдений необходимо хранить 120 сцен общим объёмом 1,8 Тбайт. Обработка данных за два года с использованием одной рабочей станции с процессором 3,2 ГГц и 16 Гбайт оперативной памяти занимала около трёх недель вычислительного времени.

Результаты обоих циклов доступны для анализа на геопортале FInSAR GeoService (http:// finsar.tech/). Представленные смещения являются проекцией реальных на линию визирования, которая для используемых данных Sentinel-1 составляет с вертикалью угол 33,5–43,5°, что обусловлено геометрией съёмки со спутниковых радиолокаторов бокового обзора. Для каждой точки или группы точек можно отрисовать всю историю смещений в течение интервала наблюдений (см. *рис. 1*) или проанализировать скорости вдоль пространственного профиля. В правой нижней части экрана размещена цветовая шкала, позволяющая оценить скорость смещения точки в миллиметрах в год. Максимальная точность, рассчитанная в соответствии с предложенной формулой, составила 4 мм, среднее значение — 1,9 мм.

Для построения и публикации растровых картосхем дополнительных характеристик потенциально опасных зон деформаций предлагается использовать точечно-зональную методологию представления результатов обработки спутниковых радиолокационных данных, что существенно повысит значимость и возможности дальнейшего использования данных космического мониторинга. Реализована следующая последовательность:

1. На основании точечных слоёв скоростей смещения посредством атрибутивной выборки создаются слои с положительными (слой поднятий) и отрицательными (слой просадок) значениями. Первоначальная выборка может производиться автоматически по критерию плотности точек с экстремальными значениями скорости, что позволяет исключить из рассмотрения одиночные изолированные точки или выбросы. Могут быть использованы актуальные (за 2019 г.) или ретроспективные (2016–2019) данные.

2. Для слоёв поднятий/просадок применяется процедура кластерного анализа по методу естественных границ (*англ*. Natural Breaks). Выделяются подмножества экстремальных точек, принадлежащих крайним кластерам. Для Калининградского городского округа на 2019 г. верхний кластер поднятий зафиксирован на отметке 15,6 мм (1017 точек), однако критерий плотности показал, что точки не формируют зоны, т.е. являются выбросами; нижний кластер просадок — на отметке –17 мм (1407 точек). Экстремальные точки поднятий исключены из дальнейшего анализа вследствие их низкой плотности. Для каждой экстремальной точки просадок построены и объединены буферные зоны радиусом 50 м.

3. Производится группировка зон по их объектно-пространственному назначению. Для Калининграда особый интерес представляет о. Октябрьский как объект современного активного строительства в сложных гидрогеологических условиях: стадион, крупные культурно-образовательные объекты (*puc. 2*, см. с. 80).

4. Для выбранных объектов интереса производится построение растровых слоёв скоростей смещения точек постоянных отражателей (*рис. 3*, см. с. 80) и анализ их динамики. Для построения растров использован метод обратно-взвешенных расстояний (*англ*. Inverse Distance Weighting). Так, сравнение скоростей смещений за два последовательных года показывает уменьшение абсолютных значений оседаний, что также подтверждается графиками смещений отдельных точек или выборок, созданными с использованием инструментов геопортала.



Рис. 2. Точечно-зональное представление просадки о. Октябрьский за 2019 г.: *а* — экстремальные точки (красные — просадки больше 17 мм, синие — поднятия больше 15 мм); *б* — буферные зоны экстремальных просадок (число — средняя скорость годовой просадки, мм)



Рис. 3. Карты скоростей просадки
о. Октябрьский: a - 2018 г.; $\delta - 2019$ г.

Обсуждение и выводы

Помимо территории освоения о. Октябрьский, на основании анализа актуальных данных съёмки за 2019 г. в Калининградской обл. выявлено несколько потенциальных областей интереса, характеризуемых значительными величинами просадок или разнонаправленной деформацией земной поверхности. В том числе: территория Калининградского морского торгового порта, промплощадка строящейся ТЭС Приморская, окрестности Янтарного карьера, Балтийская коса, законсервированная Балтийская АЭС.

Это обусловлено природно-климатическими особенностями Калининградской обл., такими как: высокая влажность, заболоченность, отсутствие скальных пород, множество водных потоков — рек, каналов и мелиоративных систем; наличие лагунного и морского побережий; преимущественно пересечённый холмистый рельеф, что предполагает использование специфических инженерных методов при подготовке и проведении строительных работ. Часть из них связаны с процессами трансформации различных экосистем и преобразования грунтов (свайное строительство на нестабильных грунтах, формирование щебеночно-гравийных подушек, фундаментов, дренирование и отсыпка болот, строительство дамб и каналов и т.д.).

В результате происходит существенная трансформация используемых и прилегающих ландшафтов, в том числе потенциально опасное смещение земной поверхности и техногенных объектов в процессе и после строительства, что предполагает актуальность вышеописанных исследований для региона, особенно в настоящий период, характеризуемый наращиванием объёмов капитального строительства и освоения земель различного назначения. Результаты обработки и анализа радиолокационной съёмки могут использоваться в качестве обоснования для проведения дополнительных наземных геодезических или маркшейдерских измерений, в том числе для подтверждения устойчивости грунтов после строительства или предотвращения провалов/обвалов грунтов/берегов. Например, проведённый точечнозональный анализ динамики скоростей смещений для о. Октябрьский показывает, что в результате работ по укреплению грунтов острова достигнуто существенное снижение скоростей просадок, но очаги просадок — два из четырёх — сохраняются (см. *рис. 3*). При этом грунты в районе собственно стадиона устойчивы.

Таким образом, результаты проекта показывают эффективность и практическую значимость выбранного подхода, включая обработку данных, точечно-зональный анализ и публикацию материалов для широкого доступа.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-45-390002-р-а).

Литература

- 1. Захаров А. И., Яковлев О. И., Смирнов В. М. Спутниковый мониторинг Земли. Радиолокационное зондирование поверхности. М.: Красанд, 2012. 248 с.
- 2. Филатов А. В. Программа интерферометрической обработки спутниковых радиолокационных данных (FInSAR). Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018614285. Рег. 21.11.2017.
- Copernicus Sentinel Data Access: Annual Report 2018. Copernicus Open Access Hub. 2019. 116 p. URL: https://scihub.copernicus.eu/twiki/pub/SciHubWebPortal/AnnualReport2018/COPE-SERCO-RP-19-0389 - Sentinel_Data_Access_Annual_Report_Y2018_v1.0.pdf (accessed: 30.03.2020).
- 4. *Cuenca M.*, *Hanssen R.*, *Hooper A.*, *Arikan M.* Surface deformation of the whole Netherlands after PSI analysis // Proc. Fringe 2011 Workshop. Frascati, Italy, 2011. P. 19–23.
- 5. *De Zan F., Guarnieri A. M.* TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2006. V. 44(9). P. 2352–2360.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39(1). P. 8–20.
- Haghighi M. H., Motagh M. Sentinel-1 InSAR over Germany: Large-scale interferometry, atmospheric effects, and ground deformation mapping // ZFV Zeitschrift für Geodasie, Geoinformation und Landmanagement. 2017. V. 142. P. 245–256.

8. *Hooper A*. Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation: Doctoral Thesis. Stanford University, 2006. 144 p.

Geostatistical processing of radar interferometry results in solving problems of large scale monitoring

V. M. Filatova, I. V. Nazarov, A. V. Filatov, L. F. Zhegalina

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad 236041, Russia E-mail: vifilatova@kantiana.ru

The paper describes the research and practical use of satellite radar interferometry technique for detection of ground surface deformations and technogenic objects displacements in wide areas. The information based on radar acquisitions processing serves as a basis for conducting more detailed study of the area using both remote sensing data and ground geodetic measurements. The complete system of Sentinel-1A/B interferometric processing and the geoservice for results publication were developed in the frame of the project. In summary 210 source radar scenes from 2016 to 2019 were processed. The interactive map of Kaliningrad region published at the geoportal contains point measurements of average annual displacements velocity of technogenic objects including a possibility to trace displacements history. The conducted pointwise and zonal analysis of velocities dynamics allowed to detect in the Kaliningrad region zones characterized by significant subsidence or opposite deformations and requiring high attention. One of the detected zones with high density of extreme points showing subsidence is Oktyabrsky Island. The analysis of displacements velocities dynamics on the island showed that as a result of soil strengthening, a significant decrease in subsidence rates had been achieved but two of the four deformation zones remained.

Keywords: radar interferometry, Sentinel-1A/B, geoinformational service, ground surface deformations, cluster analysis

Accepted: 14.05.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-75-82

References

- 1. Zakharov A. I., Yakovlev O. I., Smirnov V. M., *Sputnikovyi monitoring Zemli. Radiolokatsionnoe zondirovanie poverkhnosti* (Satellite monitoring of the Earth), Moscow: Krasand, 2012, 248 p.
- Filatov A. V., Programma interferometricheskoi obrabotki sputnikovykh radiolokatsionnykh dannykh (FInSAR) (Software for interferometric processing of satellite radar data (FInSAR)), Certificate of state registration of software No. 2018614285 (RU), Reg. 21.11.2017.
- 3. https://scihub.copernicus.eu/twiki/pub/SciHubWebPortal/AnnualReport2018/COPE-SERCO-RP-19-0389_-_Sentinel_Data_Access_Annual_Report_Y2018_v1.0.pdf (accessed 30.03.2020).
- 4. Cuenca M., Hanssen R., Hooper A., Arikan M., Surface deformation of the whole Netherlands after PSI analysis, *Proc. Fringe 2011 Workshop*, Frascati, Italy, 2011, pp. 19–23.
- 5. De Zan F., Guarnieri A. M., TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2006, Vol. 44, No. 9, pp. 2352–2360.
- 6. Ferretti A., Prati C., Rocca F., Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2001, Vol. 39, No. 1, pp. 8–20.
- 7. Haghighi M. H., Motagh M., Sentinel-1 InSAR over Germany: Large-scale interferometry, atmospheric effects, and ground deformation mapping, *ZFV Zeitschrift fur Geodasie*, *Geoinformation und Landmana*gement, 2017, Vol. 142, pp. 245–256.
- 8. Hooper A., Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation: Doctoral Thesis, Stanford University, 2006, 144 p.