Методы и результаты геостатистической обработки радарной интерферометрии на территории Калининградской области

В. М. Филатова, А. В. Филатов, И. В. Назаров

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

Исследования и разработки, описанные в настоящей статье, направлены на развитие и внедрение крупномасштабного мониторинга деформаций земной поверхности на основе технологии интерферометрической обработки многопроходной спутниковой радиолокационной съёмки. Периодический мониторинг обширных областей с целью выявления и наблюдения за участками, подверженными опасным деформациям, выступает перспективным направлением развития данной области знаний. Внимание уделяется постобработке точечных измерений смещений постоянных интерферометрических отражателей, полученных на основе радиолокационных данных среднего пространственного разрешения Sentinel-1A/B. Первичная обработка выполнена в программном обеспечении FInSAR, разработанном авторами в 2017 г. В статье описаны манипуляции с результатами, необходимые для устранения негативных эффектов, возникающих в процессе интерферометрической обработки и не связанных с природой изучаемых смещений. Обосновано применение ряда методов геостатистического анализа для выявления и прогнозирования зон экстремальных деформаций. Для поиска участков значительных поднятий/просадок использован нормальный график квантиль – квантиль, анализирующий поле среднегодовых скоростей смещений. Для интерполяции точечных измерений смещений применялся метод обратных взвешенных расстояний, адаптированный для учёта кластерности и интерферометрической когерентности. В результате проведённого анализа выявлены зоны интереса, характеризующиеся значительными величинами просадок или разнонаправленной деформацией земной поверхности на территории Калининградской обл.

Ключевые слова: радиолокационная интерферометрия, Sentinel-1, деформации земной поверхности, геостатистика, обратные взвешенные расстояния

Одобрена к печати: 14.09.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-74-82

Введение

Огромный накопленный архив исходных спутниковых радиолокационных данных и его постоянное пополнение новыми съёмками, а также эффективность и потенциал метода радиолокационной интерферометрии наметили вектор дальнейшего развития данной геоинформационной технологии. Метод позволяет оценивать смещения техногенных объектов и элементов природных ландшафтов с точностью до первых миллиметров, покрывая обширные площади и охватывая значительные интервалы наблюдений вплоть до 10 лет. Практическая значимость геоинформационных продуктов, получаемых на основе радиолокационных изображений (РЛИ), не вызывает сомнений. Растровые карты смещений на основе дифференциальной интерферометрии (*англ.* Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar — DInSAR) и точечные измерения по методу постоянных отражателей (*англ.* Persistent Scatterers Interferometry — PSI) используются для горно-экологического (месторождения нефти и газа, открытые горные разработки) и геотехнического (городская застройка, промышленная инфраструктура) мониторинга. Дальнейшие исследования и разработки данной технологии направлены в сторону крупномасштабного мониторинга. Вместо ретроспективного анализа ограниченной территории интереса (город, нефтегазовое месторождение, участок дороги и т. д.) результирующие карты смещений покрывают целые регионы и страны.

В силу специфики радиолокационной съёмки и математического аппарата DInSAR и PSI получаемые результаты имеют свои особенности, и их постобработка, интерпретация и визуальное представление требуют применения методов геостатистики. Существующие в настоящий момент методы отображения результатов интерферометрической обработки РЛИ в виде облака точек — распознанных постоянных отражателей с символизацией в зависимости от величины (скорости) смещения земной поверхности — не являются достаточно информативными, учитывая значительное количество точек. Для отдельных муниципальных образований Калининградской обл. количество точек колеблется от тысяч до сотен тысяч — в зависимости от площади и доли урбанизированной территории. Значительный объём генерируемых данных требует применения технологий из области больших данных (BigData) в части одновременного доступа большого числа пользователей.

Цель настоящей работы заключается в применении методов геостатистического анализа множеств точек постоянных отражателей для выявления ограниченных зон интереса, характеризующихся значительными величинами просадок или разнонаправленной деформацией земной поверхности. В данном исследовании такие области обозначаются как зоны экстремальных деформаций (просадок или поднятий).

Описание применяемых методов геостатистического анализа

Поиск участков экстремальных смещений

В работе использованы радиолокационные данные, полученные с пары спутников Sentinel-1A/B. Использован метод PSI, который выступает эффективным инструментом для мониторинга деформаций и хорошо описан в научной литературе (Захаров и др., 2012; Ferretti et al., 2001; Hooper, 2006). Для реализации метода PSI в 2017 г. разработана программа интерферометрической обработки спутниковых радиолокационных данных FInSAR (Филатов, 2017). Всего проведено три цикла обработки РЛИ Sentinel-1A/B на Калининградскую обл.: 152 РЛИ за период 06.01.2016–27.12.2018, 120 РЛИ за период 01.01.2018–16.12.2019 и 118 РЛИ за период 02.01.2019–22.12.2020 (всего ~300 сцен).

Результат обработки спутниковых радиолокационных данных по методу PSI — множество точек, для каждой из которых рассчитаны история смещений в течение интервала наблюдений, высота над опорным эллипсоидом и когерентность. На основе временных рядов смещений рассчитываются производные величины, такие как среднегодовая скорость, ускорение, среднеквадратичное отклонение от линии тренда, накопленные смещения и т. д. Наиболее популярным способом графического представления результатов является поле скоростей смещений — скалярное поле, где каждая точка расположена в соответствии со своими координатами и окрашена по значению среднегодовой скорости. В настоящем исследовании внимание уделяется этапу постобработки, когда производится работа с данными без учёта деталей метода, на основе которого они были получены. В связи с этим полученные результаты необходимо подготовить, т. е. устранить негативные эффекты, возникающие в процессе интерферометрической обработки и не связанные с природой изучаемых смещений. Если при отрисовке поля скоростей замечен градиент, то такое плавное изменение аппроксимируется полиномом 1-й степени от двух переменных (координат) и удаляется. Такая плоскость в данных возникает вследствие неточности определения пространственной базовой линии — расстояния между положением радиолокатора при повторной съёмке. Если присутствуют плавные крупномасштабные изменения по причине неполностью устранённой атмосферной компоненты, то необходимо откорректировать данные применением низкочастотного фильтра. Поскольку настоящее исследование посвящено крупномасштабному мониторингу, анализируем данные о смещениях, покрывающих территорию целого региона — Калининградской обл. В связи с этим предполагаем, что в целом исследуемая территория остаётся стабильной, показывая относительно низкие по модулю значения среднегодовой скорости смещений. Значительные опускания или поднятия поверхности, вызванные природным или антропогенным влиянием, локализованы на небольших участках. Исходя из

стабильности территории в целом, одним из этапов подготовки данных будет центрирование таким образом, чтобы мода — наиболее часто встречающееся значение — находилась около нуля. Простое среднее в этом случае не подходит, так как существенная локальная деформация может сместить его значение. Соответствующая подготовка данных позволяет проводить дальнейший геостатистический анализ как всей территории, так и отдельных районов. Таким образом, исходными данными для исследований становятся: матрица смещений TS размерностью $n_t \times n_p$, векторы географических координат LAT , LON , скоростей VEL и значений когерентности COH из n_p элементов каждый, где n_p — количество точек измерений, n_t — количество временных отметок в течение интервала наблюдений, соответствующее количеству исходных радиолокационных изображений ($n_p = 1\,758\,023$, $n_t = 118$). Поле скоростей смещений после соответствующей подготовки, включавшей фильтр низких частот и центрирование, приведено на *рис. 1*. Интерактивная карта позволяет переключаться между слоями и анализировать результаты за 2016–2020 гг.

Рис. 1. Интерактивная карта скоростей смещений на территорию Калининградской обл. за 2019–2020 гг., размещённая на геопортале

Зоны экстремальных деформаций — это локализованные участки, на которых амплитуды скоростей смещений резко отличаются от окружающих и заметны на карте (см. *рис. 1*). В качестве метода экспресс-анализа для обнаружения таких зон использовался нормальный график квантиль — квантиль. Эмпирическим путём, с проведением анализа больших объёмов данных о смещениях, полученных на основе метода PSI, установлено, что среднегодовая скорость смещений (VEL) в случае стабильности территории и отсутствия областей экстремальных деформаций подчиняется нормальному распределению. Несмотря на присутствие выбросов — отдельных точек с высокими абсолютными значениями — гистограмма распределения образует колокол, характерный для распределения Гаусса с вершиной около 0. Нормальный график квантиль — квантиль показывает корреляцию между кумулятивным распределением вероятности исследуемой величины, в нашем случае — среднегодовой скорости смещений, и нормального распределения (ArcMap, <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest>). Для проведения анализа значения исследуемой величины $VEL = (VEL_1, VEL_2, \dots, VEL_{n_p})$ упорядочиваются по возрастанию и откладываются по оси Y (*рис. 2a*). Для каждого значения VEL_i , $i = 1, \dots, n_p$, рассчитывается доля элементов выборки, не превышающих его, и обозначается как $F(VEL_i)$. По оси X откладываются квантили нормального (гауссовского) распределения ($\mu = 0$, $\sigma^2 = 1$), т.е. значения, которые нормальная случайная величина не превышает с вероятностью, равной $F(VEL_i)$. Полученный график аппроксимируется полиномом первой

степени и проводится прямая, показанная красным цветом на *рис. 2а*. Для всех точек на графике рассчитывается отклонение от прямой и в случае отклонения более чем на величину стандартного отклонения определяется верхнее пороговое значение для экстремальных просадок и/или нижнее — для экстремальных поднятий.

а

б

Рис. 2. Использование нормального графика квантиль-квантиль для экспресс-анализа зон экстремальных деформаций: *а* — выбор в нормальном графике квантиль-квантиль ($VEL \leq -45,3$); *б* — отображение выбора на карте

Посредством описанного выше анализа среднегодовых скоростей смещений техногенных объектов на территории Калининграда в 2019 г. верхняя граница экстремальных просадок найдена на уровне $-45,3$ мм/год, соответствующие точки показаны голубым цветом на карте (*рис. 2б*). На территории города обнаружены области с экстремальными просадками: о. Октябрьский и Калининградский морской порт. Преимущества экспресс-анализа по сравнению с методом естественных границ, использованным ранее (Филатова и др., 2020а), в том, что построение графика требует меньшего времени вычисления, а для выбора экстремальных точек достаточно настройки одного параметра — величины отклонения от линии аппроксимирующего полинома (см. *рис. 2а*). В составе системы автоматизированного мониторинга описанный выше метод определения экстремальных точек реализуется на языке Python с использованием модулей NumPy и SciPy.

Интерполяция накопленных смещений

Следующий этап постобработки — интерполяция точечных измерений, которая позволяет построить сглаженные растровые слои, что упростит интерпретацию результатов и зонировать область по величине смещений для дальнейшего анализа совместно с геодезическими данными. Каждая точка измерений — это антропогенный или природный объект, который стабильно отражает радиолокационный сигнал в течение интервала наблюдений. Обнаруживая область экстремального поднятия/просадки, предполагаем, что временной ряд смещений каждой точки внутри области является суммой компонент: деформации земной поверхности, собственных смещений объекта вследствие температурного сжатия/расширения и шума из-за изменения отражающих свойств. Ставится задача выделить первую компоненту, которая должна коррелировать между всеми точками внутри области. Точки, история смещений которых не подчиняется общему движению, являются выбросами.

Рис. 3. Перекрёстная проверка (кросс-валидация), сравнение смещений точек с их интерполированными значениями: *а* — точка соответствует деформации поверхности; *б* — точка-выброс

Проанализированы два широко используемых метода интерполяции: кригинг и метод обратных взвешенных расстояний (ОВР) (Демьянов, Савельева, 2010). ОВР требует меньше вычислительных ресурсов и выполняется быстрее, поэтому его целесообразно использовать в составе геопортала, где необходимо строить растровые слои «на лету». Расчёт весов не зависит от интерполируемой величины, поэтому подходит для интерполяции временных рядов смещений. Однако в исходном виде ОВР не учитывает кластерность, которая присутствует в результатах метода PSI. Плотность точек измерений выше для застроенных территории и ниже для природных ландшафтов. Для устранения негативного эффекта кластерности круг поиска (рис. 3а, слева) разбивается на четыре сектора и веса точек корректируются в зависимости от их количества в каждом секторе. Дополнительно назначим более высокие веса точкам с более высокой когерентностью *СОН*, чтобы снизить вклад от точек, которые менее стабильно отражают радиолокационный сигнал. Таким образом, вес i -й точки W_i , отстоящей от искомой не более чем на R м, является произведением трёх компонент:

$$W_i = \frac{1}{r_i^d} \cdot \frac{1}{n_i} COH_i,$$

где r_i — расстояние до искомой точки; d — степень; n_i — количество точек в секторе рядом с i -й точкой; COH_i — когерентность. Весовые коэффициенты необходимо нормализовать.

Определив веса для всех точек вокруг искомой, находим интерполированные значения для всей истории смещений за одну операцию перемножения матрицы смещений на вектор весов:

$$TS_{idw} = TS \cdot W^T,$$

где TS — временные ряды точек, попадающих в окружность радиусом R с центром в искомой точке; W — вектор-строка весовых коэффициентов.

На *рис. 3а, б* слева показан пример выбора точек в пределах радиуса $R = 50$ м для нахождения значения искомой точки. Размер синих точек показывает вес в зависимости от расстояния до центра, количества точек в каждом из четырёх секторов и интерферометрической когерентности; красные точки в расчёт не принимаются.

Интерполяция проводится в два этапа. Сначала выполняется перекрёстная проверка, сравниваются временные ряды точек с их интерполированными значениями и оценивается среднеквадратичное отклонение. Данная процедура помогает определить и удалить точки-выбросы. Например, на *рис. 3а* показана точка, смещения которой (красный график) соответствуют интерполированному значению (зелёный график), тогда как на *рис. 3б* — точка-выброс, которая не согласуется с предполагаемой деформацией поверхности. Слева приведены схемы выбора ближайших точек, размер синих точек соответствует весам W_i . Как видно из *рис. 3*, за счёт усреднения соседних интерполированных точек графики сглажены, тем самым устраняются собственные смещения самого отражающего объекта и шум. Вторым этапом рассчитываются интерполированные значения смещений для всего интервала наблюдений для точек в узлах однородной сетки заданного размера.

Результат интерполяции — трёхмерная матрица размерностью $n_x \times n_y \times n_t$, где n_x и n_y — размеры сетки, которую можно использовать для создания анимации и картосхем, отражающих динамику земной поверхности с шагом в 6 мес (*рис. 4*, см. с. 80). Графики (см. *рис. 4б, в*) показывают историю деформаций наиболее опасных центров просадки на территории о. Октябрьский.

Обсуждение результатов и выводы

Исследовательская работа выполнена в рамках проекта комплексного космического мониторинга и геостатистического анализа деформаций земной поверхности для существующих и перспективных территорий активного рекреационно-хозяйственного использования Калининградской обл. Разработаны методики автоматизированного выявления участков экстремальных деформаций. Для интерпретации результатов, дальнейшего анализа и прогнозирования метод ОВР-интерполяции адаптирован для применения к точечным измерениям, полученным по интерферометрии. Алгоритмы реализованы в составе геопортала, состоящего из клиентской и серверной частей, более подробное описание которых приведено в работе (Филатова и др., 2020б). Интерактивные карты, опубликованные на геопортале, использованы для обследования всей территории Калининградской обл.

Помимо значительной просадки на о. Октябрьский (см. *рис. 4*) выявлены следующие зоны с разнонаправленной деформацией земной поверхности:

- промышленная зона по берегам р. Преголи в Калининграде;
- территория рекультивированной свалки твёрдых бытовых отходов южнее пос. им. Космодемьянского;
- Янтарный карьер;
- Приморская ТЭЦ (в особенности участок просадок западнее промплощадки);
- зоны действующих и отработанных гидрокарьеров в русле р. Преголи в Гвардейском и Черняховском районах.

а

б

в

Рис. 4. Развитие зоны оседания на о. Октябрьский, Калининград: а — картосхемы с шагом 6 мес; б — график деформации в зоне А; в — график деформации в зоне В

В результате в регионе определены три причины возникновения экстремальных деформаций земной поверхности, выявление которых возможно с помощью использования крупномасштабной спутниковой радиолокационной интерферометрии:

- активная разработка или выведение из разработки месторождений полезных ископаемых (Янтарный карьер, промплощадка корпорации «Пятый элемент» в Краснознаменском р-не, зоны действующих и отработанных гидрокарьеров в русле р. Преголи в Гвардейском и Черняховском районах);
- строительные или землеустроительные работы, требующие значительных изменений ландшафтов (территория о. Октябрьский, рекультивированная свалка твёрдых бытовых отходов южнее пос. им. Космодемьянского, Приморская ТЭЦ, Гурьевская транспортная развязка, промплощадка законсервированной Балтийской АЭС, окрестности пограничных переходов Дубки и Черняховское — Кибартай);
- наличие гидрогеологических процессов/нарушений на урбанизированных территориях (промышленная зона по берегам р. Преголи в Калининграде, северная часть Багратионовского р-на, излучина р. Анграпы южнее г. Гусева). Данные участки требуют организации постоянного мониторинга деформации земной поверхности в связи с планами их активного освоения (возведение жилых домов повышенной высотности в бывшей промышленной зоне р. Преголи, строительство Нивенского ГОКа по добыче калийных солей, масштабная реконструкция мелиоративных систем).

На основе полученного опыта предлагается три варианта использования мониторинга деформации земной поверхности, в том числе для сопровождения геодезических наблюдений на площадных или линейных участках:

- ретроспективный анализ смещений для участка наблюдений и окрестностей — до начала работ — при наличии на участке наблюдений постоянных отражателей. Цель — предварительное детектирование зон повышенного риска для увеличения плотности геодезических замеров на выявленных участках;
- мониторинг объектов после сдачи их в эксплуатацию для оценки эффективности мероприятий по укреплению грунтов. Цель — выявление мест ненормативных смещений для постановки дальнейших наземных измерений;
- текущий сопровождающий космический мониторинг с плавающим годовым (полугодовым) базисом оценки смещений. Цель — предоставление актуальной и малозатратной дополнительной информации для оценки смещений. Например, в интересах администрации Калининграда была проанализирована двухлетняя динамика смещений для района выселяемых девятиэтажных домов на Московском проспекте.

Работа выполнена при совместной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калининградской обл., проект № 19-45-390002-р-а.

Литература

1. Демьянов В. В., Савельева Е. А. Геостатистика: Теория и практика. М.: Наука, 2010. 327 с.
2. Захаров А. И., Яковлев О. И., Смирнов В. М. Спутниковый мониторинг Земли. Радиолокационное зондирование поверхности. М.: Красанд, 2012. 248 с.
3. Филатов А. В. Программа интерферометрической обработки спутниковых радиолокационных данных (FInSAR). Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018614285. Рег. 21.11.2017.
4. Филатова В. М., Назаров И. В., Филатов А. В., Жегалина Л. Ф. (2020а) Геостатистическая обработка результатов радарной интерферометрии при решении задач крупномасштабного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 75–82. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-75-82.
5. Филатова В. М., Назаров И. В., Филатов А. В. (2020б) Крупномасштабный мониторинг смещений техногенных объектов методом радарной интерферометрии // Геоинформатика. 2020. № 3. С. 53–61.
6. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39. No. 1. P. 8–20.

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

Methods and results of geostatistical processing of radar interferometry data over Kaliningrad Region territory

V. M. Filatova, A. V. Filatov, I. V. Nazarov

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

The research and development described in the article are aimed at the development and implementation of large-scale monitoring of ground surface deformations based on the technology of interferometric processing of multi-pass satellite radar imagery. Periodic monitoring of large areas in order to identify and monitor areas exposed to dangerous deformations is the perspective direction for the development of this area of knowledge. Attention is paid to post-processing of point measurements of displacements of persistent interferometric scatterers based on Sentinel-1A/B medium spatial resolution radar data. Primary processing was performed using the FInSAR software developed by the authors in 2017. The article describes the manipulations with the results necessary to eliminate the negative effects arising in the interferometric processing, and not related to the nature of the studied displacements. The use of a number of methods of geostatistical analysis for identifying and predicting zones of extreme deformations has been justified. The normal quantile-quantile plot, which analyzes the field of average annual displacement rates, was used to detect areas of significant uplift/subsidence. The method of inverse weighted distances adapted to take into account clustering and interferometric coherence was used to interpolate point measurements. The analysis identified zones of interest characterized by significant values of subsidence or multidirectional deformation of ground surface on the territory of the Kaliningrad Region.

Keywords: radar interferometry, Sentinel-1, ground surface deformations, geostatistics, inverse distance weights

Accepted: 14.09.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-74-82

References

1. Demyanov V. V., Saveleva E. A., *Geostatistika: Teoriya i praktika* (Geostatistics: Theory and practice), Moscow: Nauka, 2010, 327 p. (in Russian).
2. Zakharov A. I., Yakovlev O. I., Smirnov V. M., *Sputnikovyi monitoring Zemli. Radiolokatsionnoe zondirovanie poverkhnosti* (Satellite monitoring of the Earth. Surface radar sensing), Moscow: Krasand, 2012, 248 p. (in Russian).
3. Filatov A. V., *Programma interferometricheskoi obrabotki sputnikovykh radiolokatsionnykh dannykh (FInSAR)* (Program for interferometric processing of satellite radar data (FInSAR)), Certificate of state registration of software No. 2018614285 (RU), Reg. 21.11.2017.
4. Filatova V. M., Nazarov I. V., Filatov A. V., Zhegalina L. F. (2020a), Geostatistical processing of radar interferometry results in solving problems of large scale monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 17, No. 3, pp. 72–82 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-75-82.
5. Filatova V. M., Nazarov I. V., Filatov A. V. (2020b), Large scale monitoring of technogenic objects displacements using radar interferometry technique, *Geoinformatika*, 2020, No. 3, pp. 53–61 (in Russian).
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. Hooper A., *Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation: Doctoral Thesis*, Stanford University, 2006, 144 p.