

Опыт мониторинга оседаний земной поверхности в урбанизированных районах методом радиолокационной спутниковой интерферометрии на примере города Санкт-Петербург

© 2020 г. В.Ю. Ширшова

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

vshirshova.msu@yandex.ru

The experience of monitoring the land subsidence in urban areas by radar satellite interferometry on the example of St. Petersburg

V. Shirshova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

vshirshova.msu@yandex.ru

Received April 13, 2020

Revised June 5, 2020

Accepted August 3, 2020

Keywords: land subsidence, urban areas, DinSAR, QGIS, Python, SAR interferometry, Sentinel-1, SNAP.

Summary. The St. Petersburg is a coastal city and the topography of it is mostly flat and the elevation ranges approximately between 1–5 m above sea level. It is situated on the shores of the Neva River, at the head of the Gulf of Finland in the Baltic Sea. Flooding risks are therefore a major concern. However, many of the coastal cities are subjected to severe natural and anthropogenically induced disasters, such as, flooding, storm surges, and land subsidence. Hence, monitoring surface deformation in the St. Petersburg is crucial to plan and reduce disasters risks. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) measurement has the potential to enhance the information available from conventional surveying techniques, increasing spatial and temporal coverage at low cost, with potential for ongoing monitoring. InSAR is the most suitable technique for detecting and mapping subsidence of various types of urban areas. The technique industry has been actively developing in using remote sensing data and there are several methods of interferometric processing. These include classical differential interferometry (DInSAR) and serial interferometric methods. The rapid increase of the open radar data volume after the launch of Sentinel-1 satellites suggests the relevance of the research. The aim was at developing methods for detecting displacements of the earth's surface in cities for securing the safe life of a large number of people. The research presents the results of the new monitoring technique based on the method of radar satellite interferometry using open data from the Sentinel-1 radar satellite. The method of multitemporal DInSAR was chosen from existing methods of satellite radar interferometry for determining the subsidence of the earth's surface in urban areas. This method was applied for St. Petersburg and was based on the Sentinel-1 data received from June 2018 to May 2019. It was produced data's specified requirements to create subsidence maps using 41 images downloaded for the selected monitoring period. Radar image processing was implemented on SNAP, open source software. As a result, 40 maps of vertical displacements of the city of St. Petersburg was generated. Based on the QGIS geographic information software an analysis and visualization of the results of interferometric processing were performed. Thus, it was possible to identify a systematic subsidence of the soil due to the breakthrough of underground utilities in the Frunze district of St. Petersburg, which caused the accident. An insignificant decrease in soil subsidence was observed over the course of a month. The maximum value recorded by satellite data was 25 cm. The emergency situation that occurred in the time interval corresponding to the monitoring confirms the subsidence detected as a result of interferometric processing. Thus proposed procedure allows a continuous monitoring land subsidence based on open SAR data and open software. In the future, this method can be used to monitor displacements of the surface and prevent emergencies in the urban areas.

Citation: Shirshova V. The experience of monitoring the land subsidence in urban areas by radar satellite interferometry on the example of St. Petersburg. *Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying»*. 2020, 64 (4): 000–000. [In Russian]. DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-4-000-000.

Поступила 13 апреля 2020 г.

После доработки 5 июня 2020 г.

Принята к печати 3 августа 2020 г.

Ключевые слова: оседания земной поверхности, спутниковая радиолокационная интерферометрия, урбанизированные территории, DinSAR, QGIS, Python, Sentinel-1, SNAP.

Разработана и опробована методика мониторинга на основе метода радиолокационной спутниковой интерферометрии с применением открытых данных радиолокационного спутника Sentinel-1. Обработка радиолокационных снимков была реализована на открытом программном обеспечении SNAP. В результате были получены 40 карт вертикальных смещений города Санкт-Петербург. На основе геоинформационного программного обеспечения QGIS был произведен анализ полученных карт смещений и визуализация результатов интерферометрической обработки.

Для цитирования: *Ширшова В.Ю.* Опыт мониторинга оседаний земной поверхности в урбанизированных районах методом радиолокационной спутниковой интерферометрии на примере города Санкт-Петербург // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2020. Т. 64. № 4. С. 000–000. DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-4-000-000.

Введение

Деформации земной поверхности часто приводят к опасным последствиям, несущим вред жизни и деятельности людей и влекущим за собой экономические убытки. Так, процессы оседания происходят не только в местах добычи полезных ископаемых или строительства, но и в местах, где, казалось бы, давно сформировалась и устоялась поверхность — в городах. Одна из особенностей прибрежных городов — подверженность к серьезным природным и антропогенным бедствиям, таким как наводнения, просадки грунта, которые в свою очередь часто приводят к чрезвычайным ситуациям. Возрастающая техногенная нагрузка, вызванная строительством домов и сооружений, новых станций метро, пагубно сказывается на подземном пространстве города в виду геологических особенностей приморских городов и, в частности, Санкт-Петербурга.

Санкт-Петербург — уникальный город России с богатой историей и памятниками архитектуры. Охрана и контроль их состояния является серьезной задачей сохранения культурного наследия. В последние десятилетия города коснулись неизбежные урбанизационные процессы — он стал расширяться и «модернизироваться». На сохранность памятников культуры негативное воздействие оказывает суровый климат и геологические условия: город расположен на болотистых почвах с разбросом высот от 1 до 30 м над уровнем моря, а в центральных (исторических) районах от 1 до 5 м, что подвергает жизни горожан риску, связан-

ному с наводнениями и затоплениями. Вместе с тем, постоянно усиливается антропогенное воздействие на сформировавшиеся ландшафты из-за строительства зданий и подземных тоннелей, утечек из подземных водопроводов. Усугубляет картину развитие инфраструктуры на намывных прибрежных территориях и обширные площади засыпанных болот. Все эти факторы определяют предпосылки возникновения оседаний на территории Санкт-Петербурга, что обуславливает необходимость в мониторинге просадок земной поверхности и своевременном их выявлении.

К известным методам мониторинга смещений земной поверхности относятся: наземные инструментальные наблюдения, технологии глобальных навигационных спутниковых систем, наземное лазерное сканирование, аэрофотосъемка, съемка наземным радаром и в последнее десятилетие все большую популярность набирают методы *радиолокационной спутниковой интерферометрии*. За просадками на промышленных территориях обычно ведутся наблюдения традиционными геодезическими методами. Впрочем, сейчас они уходят на второй план в виду своей дороговизны и уступают место аэрокосмическим наблюдениям. Однако детальному мониторингу подвергаются территории горнодобывающих работ и места проведения ремонтной деятельности и строительства, а причин оседаний земной поверхности в урбанизированных районах много и не всегда очевидны места их появлений. В таком случае дистанционное зондирование

Земли (ДЗЗ) из космоса — это надежный инструмент для глобального мониторинга, с помощью которого возможно предотвратить риски возникновения чрезвычайных ситуаций. Наибольшее развитие и популярность получил метод радиолокационной спутниковой интерферометрии. Он представляет собой эффективное средство определения смещений земной поверхности и деформаций сооружений.

Спутниковая радиолокационная интерферометрия — активно развивающаяся в последние несколько десятилетий отрасль применения данных ДЗЗ в том числе и для оценки просадок земной поверхности в городах. На сегодняшний день существует несколько методов интерферометрической обработки. К ним можно отнести классическую дифференциальную интерферометрию (DInSAR) и серийные интерферометрические методы, основанные на единовременной обработке более двух снимков: малых базовых линий SBAS (Small Baseline Subset), постоянных отражателей PSI (Persistent Scatterers Interferometry), интерферометрический анализ точечных целей IPTA (Interferometric Point Target Analysis).

В течение последних двух десятилетий разработка передовых серийных методов интерферометрической обработки [1–3] позволила проводить масштабный мониторинг изменений на поверхности Земли путем генерации временных рядов деформаций местности с использованием последовательностей разновременных радиолокационных изображений (РЛИ). Анализ многовременных РЛИ уже успешно применяется для изучения деформаций в прибрежных мегаполисах [4–6].

Чаще всего для городских территорий применяется метод интерферометрии постоянных отражателей (PSI) в виду того, что в городах не требуется дополнительная установка угловых отражателей, так как ими служат крыши зданий [7, 8]. Потенциал метода PSI для мониторинга урбанизированных территорий был подробно рассмотрен немецкими учеными в 2004 г. [9]. По их мнению, метод постоянных отражателей предназначен для деталь-

ных радиолокационных съемок, так как его применение позволяет определить деформации не только поверхности, но и сооружений. Были успешно проведены работы с применением метода PSI для разновременных рядов ERS, ENVISAT, TerraSAR и COSMO-SkyMed. Применение данных очень высокого разрешения, таким как снимки, полученные с TerraSAR или COSMO-SkyMed, обеспечивает большую детальность изображения объектов и гораздо более высокую плотность постоянных отражателей в городе. По сравнению с данными с ERS или ENVISAT, плотность отражателей может увеличиться в 100–200 раз в одной и той же области. Часто на одном большом фасаде или крыше здания их можно найти от нескольких десятков до ста и более. Следовательно, отдельные здания и инфраструктура могут контролироваться с точки зрения структурной нагрузки и сезонной деформации.

В последнем опубликованном исследовании, проведенном по Санкт-Петербургу, применяются открытые спутниковые данные Sentinel-1 и метод малых базовых линий (SBAS), на основе которого были рассчитаны двумерные временные ряды горизонтальных и вертикальных деформаций грунта для задач мониторинга прибрежных территорий, подверженных риску наводнений. Полученные результаты указывают на то, что деформации в городе преимущественно вертикальные с максимальной скоростью оседания около 20 мм/год, приуроченные к новым намывным территориям [10]. К сожалению, на текущем этапе проведенного исследования имеется проблема нехватки данных, охватывающих всю интересующую территорию в течение длительного периода, что препятствует генерации долгосрочных временных рядов деформации. Имея в виду, что с Sentinel-1 регулярно поступают данные, покрывающие город, предполагается провести дальнейшие оценки на основе новых данных.

Особый интерес для мониторинга просадок прибрежных территорий представляет мультिवременной метод классической дифферен-

циальной интерферометрии (Multi-Temporal DInSAR), применяемый при формировании глобальных карт вертикальных смещений, а не оценки выборочных участков. Так, исследование, проведенное в 2002 году для прибрежного города Прато (Италия) на основе спутниковых данных ERS-1/2, дало возможность определить стабильные и деформированные участки города и установить, что скорость деформации представляется относительно постоянной [4, 11–14]. Тем не менее, для верификации метода DInSAR, как и остальных серийных методов, необходимы наземные наблюдения.

Отличительной чертой большинства существующих методик, которые в основном апробировались на небольших участках, является их реализация с применением коммерческих спутниковых данных, чаще всего по данным TerraSAR, CosmoSky-Med, Radarsat-2. Множество различных методов интерферометрической обработки и разнообразие радиолокационных спутников дают возможность совершенствовать получаемые результаты, а благодаря геоинформационным технологиям визуализировать результаты и получать статистическую информацию. В связи с этим актуальной является разработка новых эффективных и доступных методик мониторинга смещений земной поверхности.

Запуск европейского радиолокационного спутника Sentinel-1, данные которого свободно распространяются, предоставил возможность для разработки методик с использованием открытых данных. Цель в разработке метода применения свободно распространяемых данных радарного спутника Sentinel-1 и открытого программного обеспечения для выявления оседаний поверхности урбанизированных территорий методом радиолокационной спутниковой интерферометрии на примере г. Санкт-Петербург.

Материалы

В рамках Copernicus Programme свободно предоставляются данные на период не более одного года. Из архива [15] были отобраны все

доступные снимки спутников Sentinel-1A и 1B, характеристики (параметры) которых приведены в таблице. Весь набор данных составил 41 снимок. Охват исследуемой территории (г. Санкт-Петербург) представлен на снимке (рис. 1).

Для интерферометрической обработки используется интерферометрический широкозахватный режим (Interferometric Wide Swath — IW), который реализуется при использовании технологии съёмки TOPSAR (Terrain Observation with Progressive Scans SAR) [16]. Этот режим является разновидностью широкозахватного режима ScanSAR. Для Sentinel-1 реализован один из принципов данной технологии предполагающий охват в 3 полосы (swath) и 8 частично пересекающихся полигонов — подполос (bursts). В основе технологии TOPSAR лежит переключение зондирующего луча не только в направлении дальности, но и его перемещение вперёд и назад в азимутальной плоскости. За счёт съёмки в трёх рядах по дальности обеспечивается полоса захвата шириной 250 км. Режим IW — основной для съёмки поверхности суши.

Пространственная базовая линия у выбранных снимков должна быть не более определенного критического значения, для Sentinel-1 IW — около 200 м. Как правило, этому требованию удовлетворяют данные, относящиеся к одной орбите. У каждого из спутников Sentinel-1 получается 175 таких орбит за 12 дневный цикл облета планеты. Снимки также должны относиться к одному виду движения спутника: восходящему или нисходящему [17].

Уровень обработки SLC — это комплексные радиолокационные данные, то есть содержащие амплитуду и фазу сигнала. Продукты состоят из ориентированных данных РЛИ, имеющих географическую привязку с использованием данных орбиты и положения спутника и предоставляемых в геометрии с нулевым доплеровским наклоном. Данные этого уровня используются в интерферометрической обработке для получения информации о высотах и смещениях зондируемой поверхности [17].

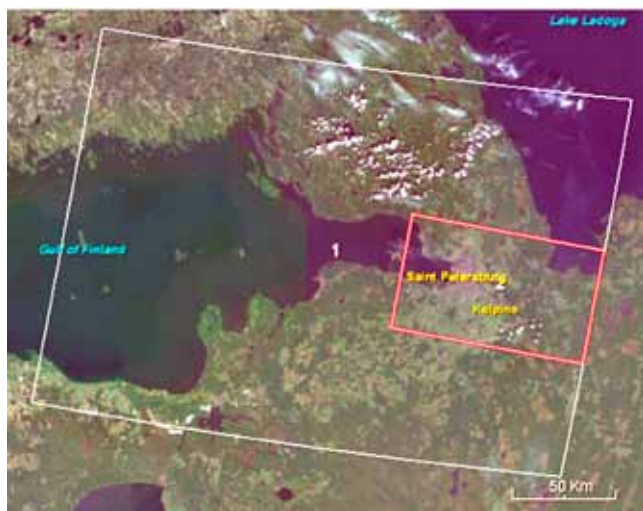


Рис. 1. Исследуемая территория.

Рамками выделены: белой — охват снимка Sentinel-1; красной — территория мониторинга

Fig. 1. Study area.

Are highlighted by frames: white — Sentinel-1 scene location; red — monitoring area

Характеристика использованных радиолокационных снимков Sentinel-1

Диапазон съемки, ГГц/см	C (5,4/5,6)
Режим съемки	IW – Interferometric Wide Swath, интерферометрический широкозахватный
Уровень обработки	SLC – Single Look Complex – комплексные радиолокационные данные, содержащие амплитуду и фазу сигнала
Пространственный охват, км	250
Размер пикселя, м	5×20
Поляризация	Согласованная вертикальная (BB – VV)
Полосы (swath)	1 (IW1)
Подполосы (bursts)	5, 6, 7
Даты съемки	2018 г.: 11, 17, 23, 29 июня, 5, 11, 17, 23, 29 июля, 4, 10, 16, 22, 28 августа, 9, 15, 21, 27 сентября, 3, 9, 15, 21, 27 октября, 2, 8, 14, 26 ноября, 8, 20 декабря; 2019 г.: 1, 13, 25 января, 6, 18 февраля, 2, 14, 26 марта, 7, 19 апреля, 1 мая
Номер витка	7
Направление орбиты	Нисходящая
Базовая линия, м	До 200
Количество снимков	41
Объем снимков, Гб	348,5

Методы

Теоретические основы метода классической дифференциальной интерферометрии хорошо известны [18–21]. Радиолокационные изображения являются комплексными, поскольку они содержат две компоненты на пиксель, из которых можно получить амплитуду и фазовый сигнал. Интерферометрические методы мониторинга деформации поверхности основываются на информации, содержащей в фазе, по меньшей мере, двух изображений, полученных в разное время на одну и ту же область. Это основная концепция дифференциальной интерферометрии (DInSAR). Повторное получение изображений в заданной области обычно выполняется с использованием того же датчика (или идентичных датчиков, например, ERS-1 и ERS-2 или Sentinel-1A и 1B). Схема получения деформаций при дифференциальной интерферометрии для площади в один пиксель P приведена на рис. 2.

Для получения дифференциальной интерферограммы и последующей оценки смещений используются два изображения, одно из которых является основным (master — глав-

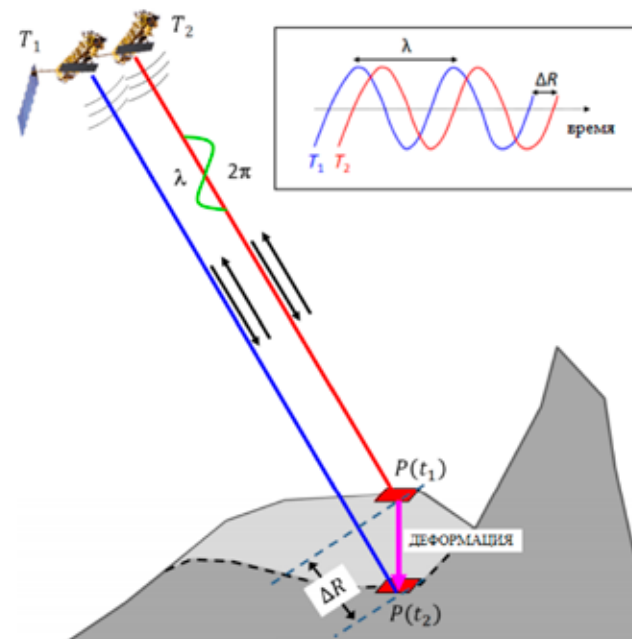


Рис. 2. Схема получения деформаций при дифференциальной спутниковой интерферометрии [22]

Fig. 2. DInSAR basic concept [22]

ный снимок, от которого идет начало отсчета), а второе — вспомогательным (slave — подчиненный, полученный после главного).

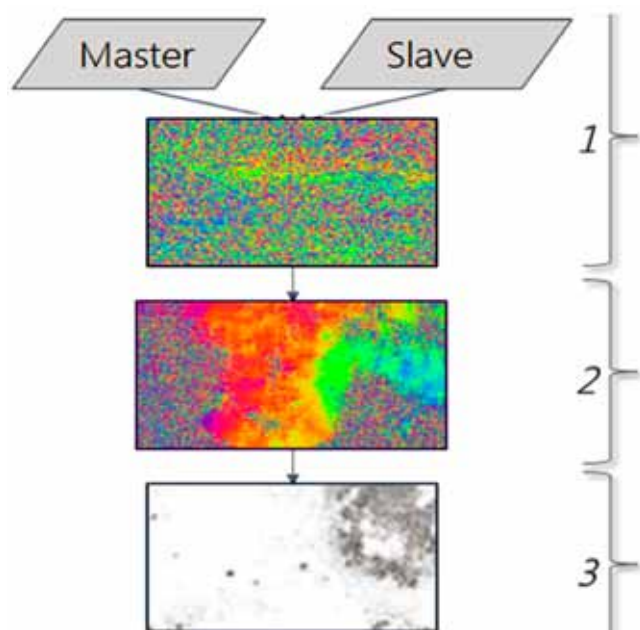


Рис. 3. Этапы обработки снимков для формирования карты смещений (см. текст)

Fig. 3. Steps of SAR images processing to create a subsidence map (see text)

Построение карты смещений включает в себя три основных этапа обработки данных (рис. 3):

- 1 — Корегистрация;
- 2 — Построение дифференциальной интерферограммы;
- 3 — Формирование карты смещений.

Для обработки отобранных снимков использовался программный комплекс SNAP — свободно распространяемое программное обеспечение, разрабатываемое Европейским космическим агентством (ESA) для обработки данных, получаемых со спутников по программе Коперник [17]. В данном программном пакете имеется возможность выполнения полного цикла последовательных действий для получения карт смещений.

Для обработки одной пары интерферометрических данных Sentinel-1 был разработана следующая схема последовательных действий (рис. 4).

1 этап — получение данных. Получение серии данных с официального сайта [15] —

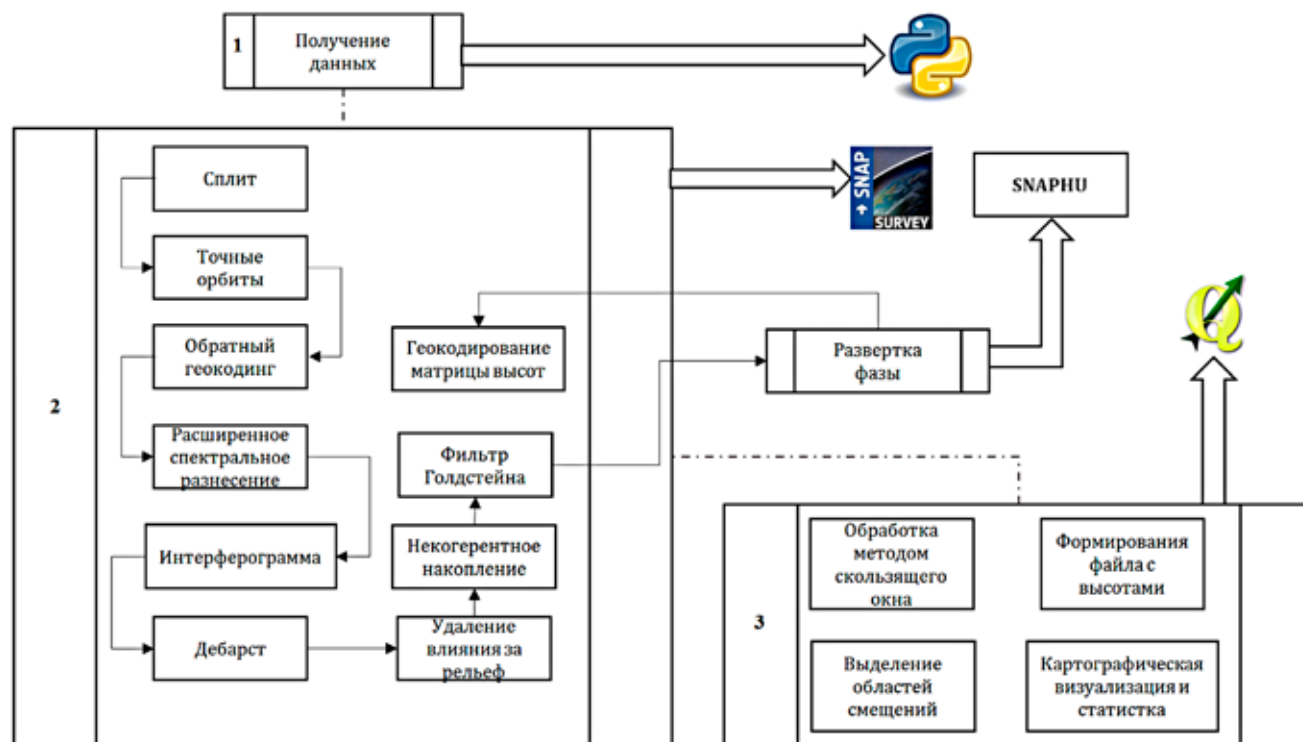


Рис. 4. Блок-схема методики мониторинга

Fig. 4. The flowchart for the monitoring procedure

длительный процесс, по причине того, что одновременно можно скачивать не более двух снимков. Кроме того объем одного снимка 4 Гб, а потому процедура довольно продолжительная. При скачивании больших массивов данных необходима автоматизация этого процесса. Для этого был написан программный код с использованием открытой библиотеки функций Python «SatSentinel» [23]. В текстовом документе были прописаны параметры, необходимые для скачивания данных (см. таблицу), включая границы исследуемого участка в формате GeoJSON. Всего получен 41 снимок.

2 этап — обработка. Функционал SNAP включает Graph Builder, который служит для создания последовательностей обработки данных, их редактирования и управления этапами. Рабочие процессы, соединённые друг с другом в последовательности инструментов обработки: результат работы одного инструмента поступает в обработку другим инструментом, были собраны в три модели, соответствующие этапам (см. рис. 3). Использованы стандартные настройки обработки (рис. 5).

3 этап — визуализация результатов обработки и расчет статистики. Визуализация

результатов может быть выполнена в любом программном обеспечении, которое поддерживает растровые данные в формате GeoTiff. На основе растровой информации, содержащей в каждой ячейке информацию о величине смещения, можно получать изображения очагов смещений, повторяемости явлений оседаний и другие, а также рассчитывать динамику смещений и делать прогнозы.

Результаты

В результате обработки было получено 40 карт смещений (subsidence maps), в которых по каждой паре дат получены смещения с сантиметровой точностью. По ним удалось установить, что просадки грунта в основном распределены в северной и южной частях города, где ведутся строительные работы. То есть это временные деформации, связанные с проводимыми работами. Помимо этого, были выявлены территории проведения ремонтных работ на местах прорыва подземных коммуникаций.

Так, одно из заметных оседаний обнаружено к северо-востоку от центра изображения. Оно связано с прорывом труб на ул. Замшина 9 июля 2018 г. (рис. 6).

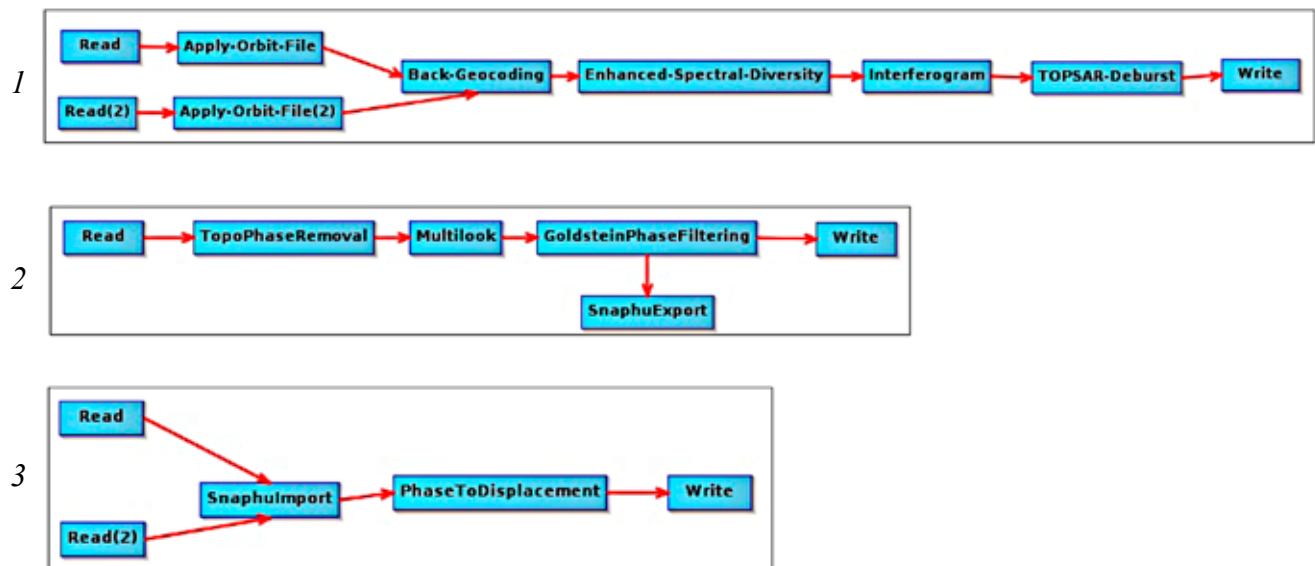


Рис 5. Последовательность обработки пар радиолокационных изображений: 1 — корегистрация; 2 — развертка фазы; 3 — формирование карт смещений

Fig. 5. Graphs of processing pairs radar images: 1 — coregistration; 2 — phase unwrapping; 3 — a subsidence map creating



Рис. 6. Изменения высоты поверхности на ул. Замшина 9 июля 2018 г.

Fig. 6. Surface height changes on the Zamshin Str. July 9, 2018

Наиболее интересен пример с южной частью города. Во Фрунзенском районе 24 апреля 2019 г. из-за прорыва трубы с горячей водой провалился автобус. На основе растровой статистики в QGIS, полученной по 40 картам смещений, был построен график динамики высоты земной поверхности для места аварии (рис. 7). На графике видно, что в течение двух месяцев, предшествующих провалу, в этой области наблюдалось незначительное оседание грунта, как оказалось впоследствии из-за просачивания горячей воды. Максимальное значение опускания поверхности получено за несколь-

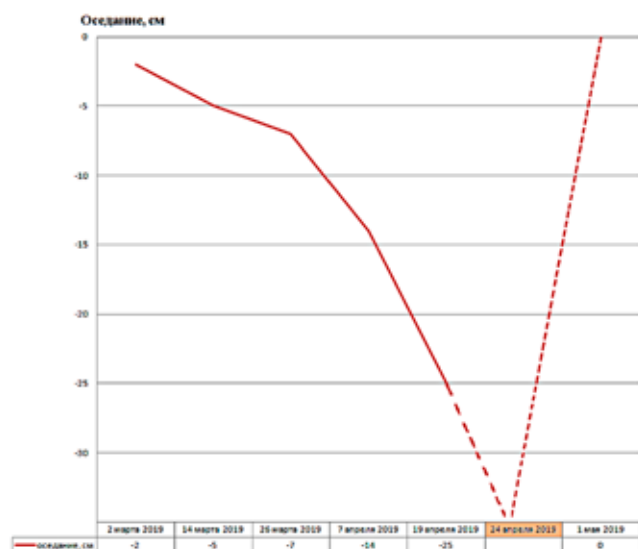


Рис. 7. Изменение высоты поверхности вследствие оседания грунта на перекрестке улиц Будапештской и Димитрова в период с 2.03.2019 – 1.05.2019 г.

Fig. 7. Change in surface height due to the land subsidence at the crossroad of Budapest and Dimitrov Strs. during 03/02/2019 – 05/01/2019

ко дней до аварии — 19 апреля, оно составило 25 см. На сам день прорыва водопровода данных нет. На 1 мая отсутствует вертикальное смещение вследствие выполненных ремонтных работ.

С использованием функции QGIS — растровый калькулятор был получен растр «Повторяемости оседаний грунта». Он представлен в виде схемы вертикальных смещений на перекрестке улиц Будапештской и Димитрова с локализованными местами оседаний за период 2.03.2019–1.05.2019 (рис. 8), где красными точками обозначены места с наибольшей встречаемостью пикселей с отрицательной высотой за выбранный период, жёлтыми точками обозначены статичные места. Возможно, имея такую систему мониторинга, удалось бы предотвратить чрезвычайную ситуацию.

Заклучение

Оседания земной поверхности в урбанизированных районах — проблема, по праву занимающая важное место в современном мире, которая неизбежно нуждается в оперативном и постоянном наблюдении для предотвращения возможных последствий. Давно зарекомендовавший себя метод дифференциальной спутниковой интерферометрии эффективно применим и для мониторинга оседаний в урбанизированных районах. Благодаря открытым радиолокационным данным Sentinel-1 и открытому



Рис. 8. Схема вертикальных смещений (см. текст)

Fig. 8. Vertical displacement schema (see text)

программному обеспечению для обработки радиолокационных данных — SNAP и для геоинформационного анализа и картографической визуализации — QGIS, была реализована методика мониторинга смещений земной поверхности в городе Санкт-Петербурге.

Апробирование методики на данных по Санкт-Петербургу за период с июня 2018 по май 2019 г. позволило установить отсутствие аномальных критических смещений на территории города. Тем не менее, удалось выявить систематическое оседание грунта из-за прорыва подземных коммуникаций во Фрунзенском районе, которое послужило предпосылкой ава-

рии. Помимо этого, были идентифицированы места проведения строительных и ремонтных работ, что свидетельствует о корректной работе алгоритма дифференциальной интерферометрической обработки и его пригодности для мониторинга.

Стоит отметить, что апробация произведена только на основе общедоступных радиолокационной спутниковой информации Sentinel-1 без привлечения наземных наблюдений. Для верификации предложенной методики интересно выбрать другие урбанизированные территории с иными природными условиями и инфраструктурными особенностями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2002. Т. 40. №. 11. P. 2375–2383.
2. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2001. Т. 39. №. 1. P. 8–20.
3. Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers // *Geophysical research letters*. 2004. Т. 31. №. 23. P. 1–5.
4. Raucoules D., Le Mouélic S., Carnec C., Maisons C., King C. Urban subsidence in the city of Prato (Italy) monitored by satellite radar interferometry // *International journal of remote sensing*. 2003. Т. 24. №. 4. P. 891–897.
5. Aimaiti Y., Yamazaki F., Liu W. Multi-sensor InSAR analysis of progressive land subsidence over the Coastal City of Urayasu, Japan // *Remote Sensing*. 2018. Т. 10. №. 8. C. 1304–1329.
6. Xu B., Feng G., Li Z., Wang Q., Wang C., Xie R. Coastal subsidence monitoring associated with land reclamation using the point target based SBAS-InSAR method: A case study of Shenzhen, China // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. №. 8. P. 652–674.
7. Gernhardt S., Adam N., Eineder M., Bamler R. Potential of very high-resolution SAR for persistent scatterer interferometry in urban areas // *Annals of GIS*. 2010. V. 16. №. 2. P. 103–111.
8. Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Оловянный А.Г., Тронин А.А. Знакопеременные вертикальные движения земной поверхности по данным космической радиолокационной съемки (на примере Санкт-Петербурга) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010. Т. 7. №. 2. С. 321–332.

REFERENCES

1. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2002. 40 (11): 2375–2383.
2. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2001. 39(1): 8–20.
3. Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers // *Geophysical research letters*. 2004. 31(23): 1–5.
4. Raucoules D., Le Mouélic S., Carnec C., Maisons C., King C. Urban subsidence in the city of Prato (Italy) monitored by satellite radar interferometry // *International journal of remote sensing*. 2003. 24(4): 891–897.
5. Aimaiti Y., Yamazaki F., Liu W. Multi-sensor InSAR analysis of progressive land subsidence over the Coastal City of Urayasu, Japan // *Remote Sensing*. 2018. 10(8): 1304–1329.
6. Xu B., Feng G., Li Z., Wang Q., Wang C., Xie R. Coastal subsidence monitoring associated with land reclamation using the point target based SBAS-InSAR method: A case study of Shenzhen, China. // *Remote Sensing*. 2016. 8(8): 652–674.
7. Gernhardt S., Adam N., Eineder M., Bamler R. Potential of very high-resolution SAR for persistent scatterer interferometry in urban areas. // *Annals of GIS*. 2010. 16(2): C. 103–111.
8. Gorny V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Olovyanny A.G., Tronin A.A. Vertical Sign-Variable Movements of Land Surface According Satellite Radar Survey Data (On an Example of Saint-Petersburg) // *Modern problems of remote sensing of Earth from space*. 2010. 7(2): 321–332. [In Russian].
9. Gernhardt S., Adam N., Eineder M., Bamler R. Potential of very high resolution SAR for persistent scatterer

9. Gernhardt S., Adam N., Eineder M., Bamler R. Potential of very high resolution SAR for persistent scatterer interferometry in urban areas // *Annals of GIS*. 2010. V. 16. №. 2. P. 103–111.
10. Dashko R.E., Lebedeva Y.A. Improving approaches to estimating hydrogeological investigations as a part of engineering survey in megacities: case study of St. Petersburg // *Water resources*. 2017. V. 44. №. 7. P. 875–885.
11. Cascini L., Ferlisi S., Fornaro G., Lanari R., Peduto D., Zeni G. Subsidence monitoring in Sarno urban area via multi-temporal DInSAR technique // *International Journal of Remote Sensing*. 2006. V. 27. №. 8. P. 1709–1716.
12. Peduto D., Cascini L., Arena L., Ferlisi S., Fornaro G., Reale D. A general framework and related procedures for multiscale analyses of DInSAR data in subsiding urban areas // *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 2015. V. 105. P. 186–210.
13. Yerro A., Corominas J., Monells D., Mallorquí J.J. Analysis of the evolution of ground movements in a low densely urban area by means of DInSAR technique // *Engineering Geology*. 2014. V. 170. P. 52–65.
14. Wang Q., Zhao Q., Ding J., Fedotov A. A., Badenko V., Liu M., Pepe A. Investigation of the ground displacement in Saint Petersburg, Russia, using multiple-track differential synthetic aperture radar interferometry // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020. V. 87. P. 102050–102062.
15. Электронный ресурс: <https://scihub.copernicus.eu/>.
16. De Zan F., Guarnieri A.M. TOPSAR: Terrain observation by progressive scans // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2006. V. 44. №. 9. P. 2352–2360.
17. Электронный ресурс: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>
18. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
19. Верба В.С., Неронский Л.Б., Турук В.Э. Перспективные технологии цифровой обработки радиолокационной информации космических РСА. М.: Радиотехника, 2019. 416 с.
20. Hanssen R.F. Radar interferometry: data interpretation and error analysis. USA: Springer Science Business Media, 2001. V. 2. 307 p.
21. Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodriguez E., Goldstein R.M. Synthetic aperture radar interferometry // *Proceedings of the IEEE*. 2000. V. 88. №. 3. P. 333–382.
22. Sousa J.J., Bastos L., Monserrat O., Perski Z. Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse // *Natural Hazards Earth System Sciences*. 2013. V. 13. №. 3. P. 659–667.
23. Электронный ресурс: <https://pypi.org/project/sentinelsat/>.
- interferometry in urban areas. *Annals of GIS*. 2010. 16(2): 103–111.
10. Dashko R.E., Lebedeva Y.A. Improving approaches to estimating hydrogeological investigations as a part of engineering survey in megacities: case study of St. Petersburg. *Water resources*. 2017. 44(7): 875–885.
11. Cascini L., Ferlisi S., Fornaro G., Lanari R., Peduto D., Zeni G. Subsidence monitoring in Sarno urban area via multi-temporal DInSAR technique. *International Journal of Remote Sensing*. 2006. 27(8): 1709–1716.
12. Peduto D., Cascini L., Arena L., Ferlisi S., Fornaro G., Reale D. A general framework and related procedures for multiscale analyses of DInSAR data in subsiding urban areas. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 2015. 105: 186–210.
13. Yerro A., Corominas J., Monells D., Mallorquí J.J. Analysis of the evolution of ground movements in a low densely urban area by means of DInSAR technique. *Engineering Geology*. 2014. 170: 52–65.
14. Wang Q., Zhao Q., Ding J., Fedotov A. A., Badenko V., Liu M., Pepe A. Investigation of the ground displacement in Saint Petersburg, Russia, using multiple-track differential synthetic aperture radar interferometry. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020. 87: 102050–102062.
15. URL: <https://scihub.copernicus.eu/>.
16. De Zan F., Guarnieri A.M. TOPSAR: Terrain observation by progressive scans. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2006. 44(9): 2352–2360.
17. URL: <https://sentinel.esa.int/>.
18. Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. Radiolokacionnye sistemi zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya. Space-based ground survey radar systems. Moscow: Radiotekhnika, 2010: 680 p. [In Russian].
19. Verba V.S., Neronskiy L.B., Turuk V.E. Perspektivnye tehnologii cifrovoi obrabotki radiolokacionnoi informacii kosmicheskikh RSA. Perspective technologies for the digital processing of radar information of space-based PCAs. M.: Radiotekhnika, 2019. [In Russian].
20. Hanssen R.F. Radar interferometry: data interpretation and error analysis. USA: Springer Science Business Media, 2001. V. 2. 307 p.
21. Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodriguez E., Goldstein R.M. Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*. 2000. 88(3): 333–382.
22. Sousa J.J., Bastos L., Monserrat O., Perski Z. Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. *Natural Hazards Earth System Sciences*. 2013. 13(3): 659–667.
23. URL: <https://pypi.org/project/sentinelsat/>.