

Знакопеременные вертикальные движения земной поверхности по данным космической радиолокационной съемки (на примере Санкт-Петербурга)

В.И. Горный¹, С.Г. Крицук¹, И.Ш. Латыпов¹, А.Г. Оловянный², А.А. Тронин¹

¹Учреждение Российской академии наук Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН
197110, Санкт-Петербург, ул. Корпусная, 18

E-mail: v.i.gornyy@ecosafety-spb.ru

²Учреждение Российской академии наук Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии РАН

E-mail: agolov2009@hge.pu.ru

Комитет по государственному контролю и охране памятников Санкт-Петербурга поставил научно-исследовательскую работу, направленную на оценку эффективности применения космической радиолокационной дифференциальной интерферометрии (КРДИ) для обеспечения задач охраны объектов культурного наследия. В рамках этого исследования по материалам радиолокационных съемок спутниками ERS-1,2 и ALOS(PALSAR) на основе технологий КРДИ и космической радиолокационной интерферометрии по постоянным отражателям (КРИ ПО) построены карты деформации поверхности городской среды за период последние 10 лет. Оценка погрешностей измерения деформаций выполнена по материалам повторных спутниковых съемок. Проведено сравнение с результатами повторного нивелирования (1980-2003 гг). Выявлено, что наблюдаются периодические и эпизодические колебания поверхности городской среды, достигающие десятков миллиметров. Высказаны гипотезы о возможных причинах и механизмах таких колебаний. На этой основе предложены принципы районирования территории по уровню риска разрушения объектов культурного наследия.

Ключевые слова: спутник, радиолокация, интерферометрия, грунт, знакопеременные вертикальные движения, деформация зданий.

Введение

Санкт-Петербург является мегаполисом, сохранившим памятники архитектуры в виде крупных ансамблей. Охрана и контроль их состояния является важнейшей задачей сохранения культурного наследия. Вместе с тем, особенностью Санкт-Петербурга являются природные условия, отрицательно влияющие на сохранность памятников культуры: – сложные инженерно-геологические условия в центральной части города; – суровый климат. Постоянно возрастает техногенная нагрузка на подземное пространство города из-за строительства, сооружения подземных тоннелей, утечек из подземных водоводов горячей и сырой воды. Обсуждается создание подземных торговых зон, парковок. Картину дополняет наличие в Санкт-Петербурге намывных территорий и обширных площадей засыпанных болот. Все эти факторы определяют возможность деформаций поверхности городской среды.

Комитет по градостроительству и архитектуре Администрации Санкт-Петербурга организовал контроль за изменением высот реперов, установленных в городе. За последние 20 лет выполнен значительный объем повторного нивелирования. Учитывая темпы нового строительства в городе, когда за 2-3 года возводятся крупные здания и сооружения, такой контроль должен проводиться не реже чем через 2-3 года. Но это требует значительных ежегодных затрат. Кроме того, количество реперов Государственной геодезической сети в

Санкт-Петербурге не обеспечивает детальность, необходимую для контроля за сохранностью объектов культурного наследия.

Поэтому актуальной является разработка новых высокопроизводительных, более дешевых, методов мониторинга деформаций поверхности Санкт-Петербурга.

За рубежом имеется опыт применения КРДИ и КРИ ПО для мониторинга деформаций поверхности мегаполисов [1-11]. Необходимо отметить сложность и многоэтапность этих технологий (множество вариантов решения некорректной обратной задачи восстановления рельефа и деформаций дневной поверхности), наличие нескольких технологических схем картографирования деформаций поверхности, влияние структуры городской среды на результаты.

В связи с этим Комитет по государственному контролю, использованию и охране памятников истории и культуры в 2008 г. поставил исследование по теме: «Разработка методики картирования просадок на территории Санкт-Петербурга по данным космических радиолокационных съемок и повторных нивелировок».

Материалы

Материалы спутниковой радиолокационной съемки

Был выполнен анализ материалов съемок спутниками ERS-1 и ERS-2 и ALOS (PALSAR) (см. табл. 1), в банках данных Европейского и Японского Космических Агентств.

В результате анализа для каждого из спутников были выбраны радиолокационные сцены, удовлетворяющие требованию оптимального расстояния между повторными орбитами для получения интерференционных пар (табл. 2).

Таблица 1. Основные технические характеристики радиолокаторов, установленных на спутниках ERS(SAR) -1,2 и ALOS (PALSAR)

<i>Спутник</i>	<i>Страна</i>	<i>Дата запуска</i>	<i>Разрешение, м</i>	<i>Длина волны, см</i>	<i>Поляризация</i>
ERS(SAR) -1,2	Европа	1995	~ 30	5.6	ВВ
ALOS (PALSAR)	Япония	2006	~ 7	23.5	Полная

Топографическая основа

В качестве топографической основы использована векторная карта Санкт-Петербурга масштаба 1:10 000. Карта подготовлена в местной системе координат и содержит следующие информационные слои (табл. 3):

Таблица 2. Использованные спутниковые радиолокационные материалы

<i>Спутник</i>	<i>Дата съемки</i>	<i>Орбита</i>
ERS-1	09.10.1993	11675
ERS-1	10.04.1995	19534
ERS-1	15.05.1995	20035

ERS-1	24.07.1995	21037
ERS-2	25.07.1995	1364
ERS-1	02.10.1995	22039
ERS-1	02.10.1995	22039
ERS-2	03.10.1995	2366
ERS-2	03.10.1995	2366
ERS-2	22.10.1996	7877
ERS-2	24.06.1997	11384
ERS-2	11.11.1997	13388
ERS-2	14.07.1998	16895
ERS-2	18.08.1998	17396
ERS-2	03.08.1999	22406
ERS-2	16.11.1999	23909
ERS-2	27.06.2004	48458
ALOS (PALSAR)	11.07.2007	
ALOS (PALSAR)	26.08.2007	

Полученные в результате выполнения КРДИ материалы приводились к указанной карте с погрешностью ± 30 м.

Результаты повторного нивелирования

Использованы результаты повторного нивелирования II и III классов, выполненного ГУП «Трест ГРИИ» по 595 реперам высотной геодезической сети Санкт-Петербурга, расположенным в центральных районах в пределах зоны охраны объектов культурного наследия. Сравнение высот реперов произведено по результатам нивелирования, выполненным в 1980 и 2003 гг. Нивелирование выполнено в соответствии с действующими инструктивными требованиями [12]. Среднеквадратическая погрешность нивелирования на 1 км хода составила 5-6 мм.

Таблица 3. Содержание векторной карты ArcMap

<i>№ n/n</i>	<i>Название</i>	<i>Тип</i>	<i>Комментарий</i>
1	HYDRO	Polygon	Гидросеть
2	STREETS	Polyline	Улицы
3	BUILDINGS	Polygon	Здания
4	VEGET	Polygon	Растительность
5	Geodat_poits	Point	Реперные точки повторного нивелирования
6	Arch_area	Polygon	Охранные зоны

Карта техногенных грунтов

Использовалась карта техногенных территорий Центральных районов Санкт-Петербурга масштаба 1:10 000 (составил: А.С.Богданов [13]). Карта подготовлена с геодезической точностью. На карте нанесены: – болота засыпанные; намывные территории середины XX века; – акватории искусственные; – насыпные и намывные территории – старые.

Построены в масштабе 1:10 000 по скважинам по 4 профилям, намеченным после построения карты деформаций поверхности по данным КРДИ. Дополнительно на разрезах нанесена гидрогеологическая информация (уровень грунтовых вод, водонасыщенность отложений).

Методика

КРДИ

Теоретические основы КРДИ хорошо известны [1,14-18]. Основной принцип иллюстрирует рис. 1.

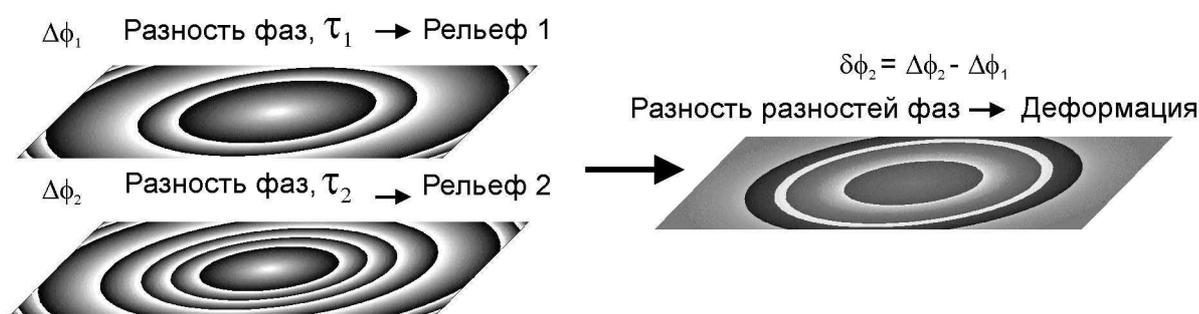


Рис. 1. Принцип КРДИ. τ_1 и τ_2 – соответственно, времена получения первой и второй интерферометрических пар. Промежуток времени между радиолокационными сценами, составляющими интерферометрическую пару выбирается минимальным

В связи с тем, что использовались как однородные материалы, полученные одними и теми же радиолокаторами, так и радиолокаторами с различной длиной волны (табл. 1), то для построения карты деформаций поверхности Санкт-Петербурга использовались как четырехорбитальная схема [14-18], так и схема, приведенная на рис. 2. По материалам съемки спутниками ERS (SAR) строилась цифровая модель рельефа (ЦМР) поверхности городской среды, после чего по этой ЦМР синтезировалась интерферограмма, которую можно было бы получить радиолокатором PALSAR, установленным на спутнике ALOS (табл.1), если бы он выполнял съемку на тех же орбитах, что и спутники ERS, по которым построена ЦМР.

При подготовке этой карты использовался пакет программ, разработанный в НИЦЭБ РАН, а для контроля – пакет программ «PHOTOMOD Radar – Интерферометрический процессор».

Алгоритм построения ЦМР по данным радиолокационной съемки приведен на рис. 3.

Предварительная обработка заключалась в создании вспомогательных изображений путем фильтрации амплитуды радиолокационной сцены. Эта операция выполнялась для облегчения совмещения радиолокационных снимков. Совмещение снимков с субпиксельной точностью выполнялось с помощью алгоритма, базирующегося на автоматическом позиционировании контрольных точек по критерию максимума когерентности. После приведения снимков друг к другу для повышения когерентности сигналов выполнялась фильтрация с помощью адаптивного фильтра Гольштейна.

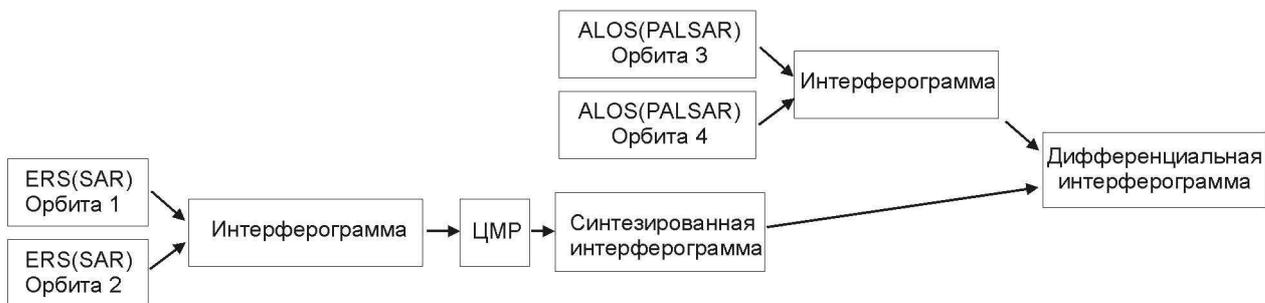


Рис. 2. Технологическая схема КРДИ с использованием материалов, полученных радиолокаторами с различной длиной волны

Отраженный сигнал от поверхности можно представить в комплексном виде:

$$U = I + jQ = |A| e^{j\phi} \quad (1)$$

где: U – зарегистрированный комплекснозначный радиолокационный сигнал; I и Q , соответственно, действительная и мнимая части этого сигнала; A и ϕ , соответственно амплитуда и фаза сигнала. После этапа совмещения выполнялось попиксельное умножение основного снимка (полученного с первой орбиты) на комплексно-сопряженный снимок (полученного со второй орбиты):

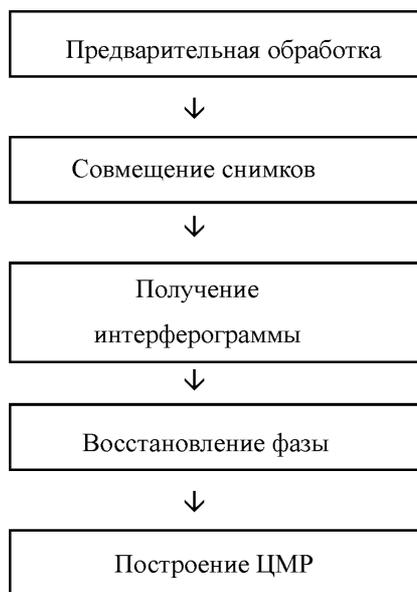


Рис. 3. Технологическая схема построения интерферограммы

$$U_1 * U_2^* = |A_1|/|A_2| e^{j(\phi_1 - \phi_2)} \quad (2)$$

В результате, формировалась интерферограмма, также представляющая собой комплекснозначное изображение. При этом амплитуда интерферограммы есть мера корреляции двух исходных изображений.

Развертка (восстановление) полной фазы решает проблему фазовой неоднозначности. Интерферограмма до развёртки фазы содержит значения фазы в пределах 0-360 гра-

дусов, в то время, как необходимо знание абсолютного значения фазы. Для восстановления полной фазы использовался метод минимизации среднеквадратической невязки фазы.

Для построения ЦМР значения полной фазы трансформировалось в относительные значения высоты дневной поверхности (относительно выбранной базовой точки). Поэтапные результаты вышеприведенной технологической схемы КРДИ приведены на рис. 5.

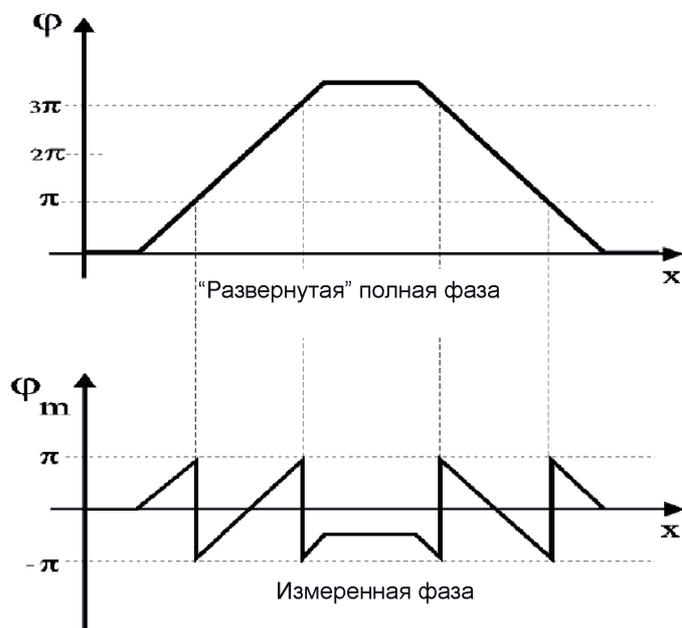


Рис. 4. Неразвёрнутая фаза (внизу) и развёрнутая фаза (вверху)

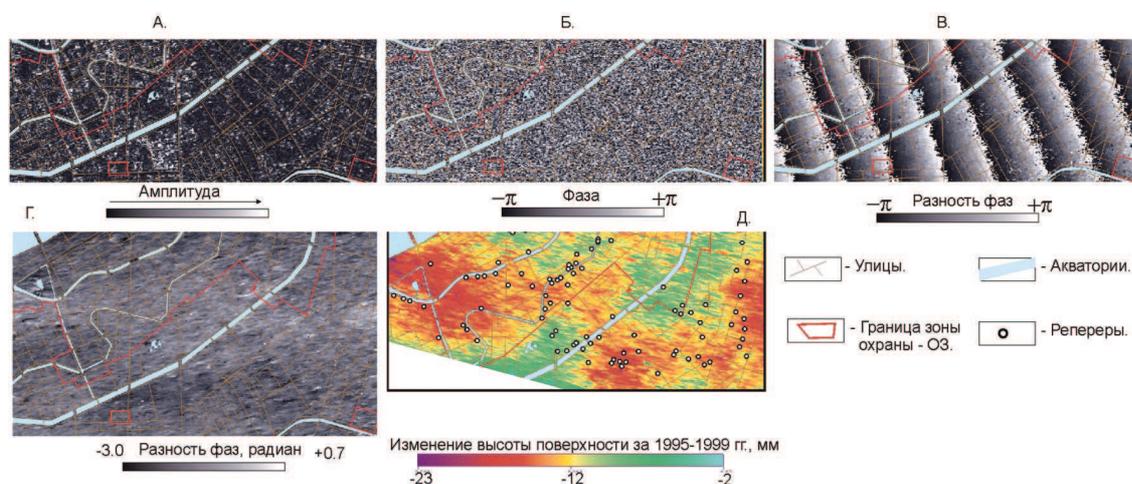


Рис. 5. Поэтапные результаты технологии КРДИ. А. Амплитуда сигнала. Б. Фаза сигнала. В. Разность фаз. Набег фазы по дальности не вычтен. Г. Разность фаз. Набег фазы по дальности вычтен. Д. Вертикальные смещения поверхности. Приведены реперы с опусканием более, чем на 32 мм за период с 1980г. по 2003 г.

КРИ ПО

Постоянные отражатель (ПО) это объект поверхности городской среды, характеризующийся высокими амплитудами отраженного радиолокационного сигнала на всех используемых сценах. При построении карт деформации поверхности применялась следующая последовательность операций:

- радиолокационные сцены ранжировались по времени;

- выбиралась основная (базовая) сцена, по критерию близости ее орбиты к орбитам остальных сцен;
- выполнялась геометрическая коррекция вспомогательных сцен, методом поточечного приведения всех сцен к основной (базовой);
- вычислялась разность фаз для каждой из вспомогательных сцен и основной сцены;
- приводились комплекснозначные сигналы вспомогательных сцен к условиям съемки с базовой орбиты;
- производился поиск ПО по всей совокупности трансформированных сцен;
- формировался каталог координат ПО;
- вычислялись фазы для каждого ПО;
- вычислялась средняя фаза по всем ПО для каждого снимка;
- выполнялось вычитание значения средней фазы сцены из фазы каждого ПО;
- выполнялась развертка полной фазы каждого ПО по всем сценам;
- для каждого ПО за исследуемый период вычислялось изменение высоты поверхности относительно базовой сцены;
- местоположение и значения деформаций городской поверхности для каждого из ПО наносилось условными знаками на топографическую карту;
- для всех ПО рассчитывался временной тренд изменения высоты ПО.
- для каждого момента съемки вычислялись отклонения значений высоты ПО от временного тренда;
- для каждого ПО вычислялось среднеквадратическое отклонение разности значений высот ПО и временного тренда;
- местоположение и значения вычисленных среднеквадратических отклонений, превышающее выбранный порог наносилось условными знаками на топографическую карту.

Пример карты деформаций поверхности городской среды, построенной по методике КРИ ПО приведен на рис. 6.

В рамках методики КРИ ПО для оценки погрешностей картографирования вертикальных смещений поверхности использованы две сцены спутников ERS, у которых промежуток времени между съемками не превышал 3 дней. По всем выделенным ПО (выборка ~15 000) рассчитаны разности относительных высот, между двумя результатами последовательных измерений. Полученные разности характеризовали погрешность КРДИ при однократной съемке. Анализ гистограммы распределения полученных разностей высот ПО показал, что распределение близко к нормальному. После этого, по результатам повторных измерений по известной формуле была рассчитана среднеквадратическая погрешность определения высоты ПО, которая составила $\sigma = 4,6$ мм.

Для методики КРИ ПО, где используется N сцен, для получения среднего за исследуемый период относительного изменения высоты ПО среднеквадратическая погрешность будет приблизительно в $N^{0.5}$ раз меньше. Для КРИ ПО за период с 1993г. по 2004г. использовалось $N=16$ сцен, соответственно, в этом случае $\sigma_{\Sigma} = 1,15$ мм и все зарегистрированные средние за этот период отклонения высот ПО превышающие $\pm 3,45$ мм с вероятностью 99,9% следует считать достоверными.

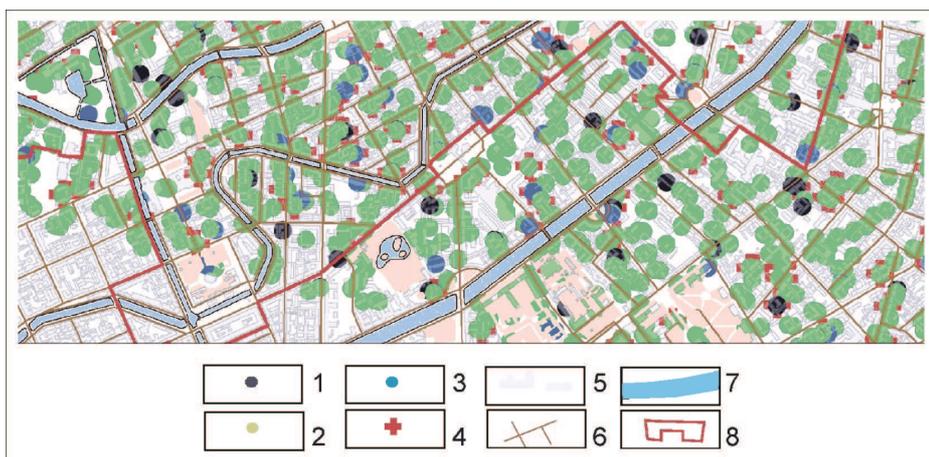


Рис. 6. Фрагмент карты деформаций поверхности городской среды, построенной по методики КРИ ПО за период с 1993 г. по 1999 г. по материалам спутников ERS-1,2.

Условные обозначения: 1. Опускание ПО более -5 мм. 2. Изменения высот ПО не более ± 5 мм. 3. Подъем ПО более $+5$ мм. 4. Среднеквадратическое отклонение высоты ПО от временного тренда более 5 мм (знакопеременные движения ПО). 5. Здания и сооружения. 6. Улицы. 7. Акватории. 8. Границы зоны охраны объектов культурного наследия – ОЗ

Кинематика поверхности городской среды по данным КРДИ и КРИ ПО

В результате реализации технологии КРДИ получена карта относительных изменений высот поверхности городской среды (рис. 7).

По данным КРИ ПО в ГИС MapInfo к каждому ПО привязаны данные о кинематике поверхности городской среды. Ярким примером является район Исаакиевской площади (рис. 8).

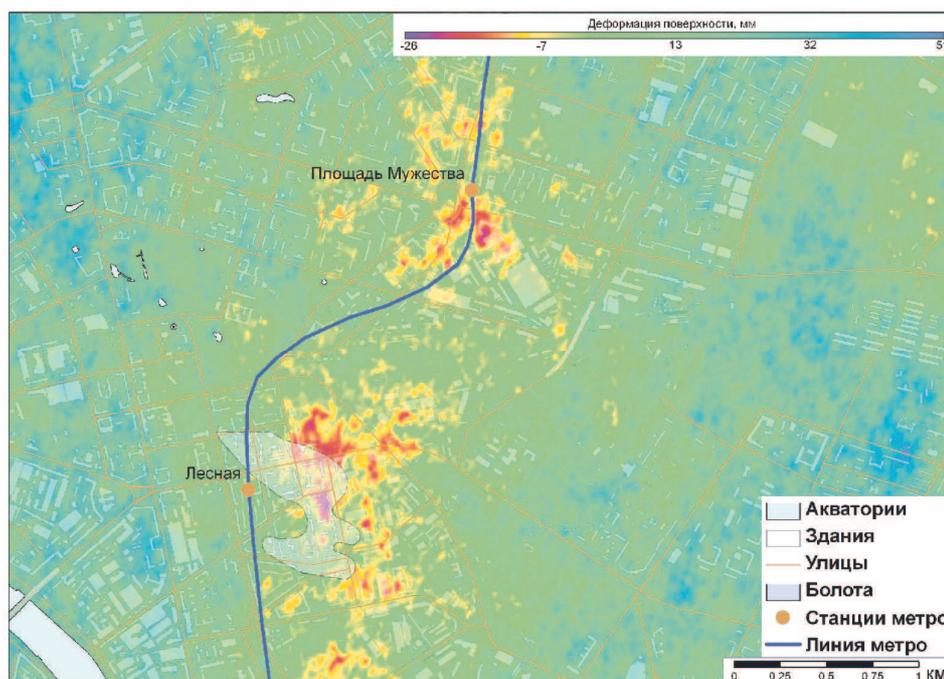


Рис. 7. Фрагмент карты деформаций поверхности городской среды Санкт-Петербурга по данным КРДИ. Район Пл. Мужества. Эпоха: 1995 – 2007 гг. Масштаб: 1:10 000



Рис. 8. Кинематика двух ПО в районе Исаакиевской площади по данным КРИ ПО по материалам спутников ERS-1,2 с 1993 г. по 1999 г.

Условные обозначения: 1. Поднимающийся ПО в западной части. 2. Опускающийся ПО в восточной части. 3. и 4. Временные тренды ПО. 5. Доверительный интервал определения вертикального смещения. Красными стрелками показаны противоположные вертикальные движения двух ПО, зеленой – время получения базовой сцены

Анализ результатов спутниковых и наземных съемок

Результаты КРДИ показывают, что на территории Санкт-Петербурга наблюдаются как просадки, так и воздымание поверхности городской среды, достигающие десятков миллиметров. Наибольшие значения вертикальных движений поверхности наблюдаются в пределах засыпанных болот и в местах осложнений инженерно-геологического строения, таких как линзы торфов и пропластки глин в верхней части отложений. Анализ же кинематики поверхности, полученной по данным КРИ ПО показал, что в отдельных местах на фоне монотонных опусканий или подъемов наблюдаются «высокочастотные» знакопеременные вертикальные движения поверхности (например, см. рис. 8).

Тем не менее, сравнение данных КРДИ с результатами повторного нивелирования показало полное отсутствие корреляции, хотя на материалах КРДИ отчетливо прослеживается связь полученных вертикальных деформаций с инженерно-геологическими условиями. Такое же полное отсутствие корреляции получено и для материалов фирмы NPA (Великобритания), подготовившей по данным КРИ ПО карту скоростей вертикальных деформаций на центр Санкт-Петербурга [11]. Но на этой карте отчетливо прослеживаются тоннели метрополитена (в том числе и незавершенные). В связи с этим было высказано предположение о том, что в пределах Санкт-Петербурга наблюдаются «высокочастотные» вертикальные движения поверхности городской среды, которые чрезвычайно трудно зарегистрировать стандартным нивелированием II и III классов. Анализ же литературы показал, что на вариационных станциях при измерениях высоты поверхности, выполняемых высокоточными GPS приемниками отмечается как сезонная цикличность результатов, так и более высокочастотные колебания, достигающие, например, в г. Екатеринбурге ± 20 мм [19]. Подобные же результаты получены при вариационных измерениях и в других регионах Земли [20-22]. Учитывая, что грунты в Санкт-Петербурге значительно слабее, чем в Екатеринбурге можно предположить, что в нашем городе мо-

гут наблюдаться значительно большие амплитуды «высокочастотных» вертикальных движений поверхности городской среды. Это предположение подтверждается наблюдениями над тоннелями метрополитена и в самих тоннелях [23,24]. Скорее всего, этим и объясняется отсутствие корреляций между данными КРДИ и КРИ ПО и результатами повторного нивелирования, т.к. нивелирование значительной по площади территории невозможно выполнить мгновенно, как это выполняет спутниковая радиолокационная съемка. Необходимо отметить, что знакопеременные вертикальные движения поверхности городской среды отмечены, также, по данным КРИ ПО в центральной части Рима (Италия). Центр Рима, также как и центр Санкт-Петербурга расположен в пределах некогда болотистой местности, сформировавшейся в палеодолине р. Тибр [10].

Предварительный анализ позволил наметить несколько возможных причин «высокочастотных» вертикальных движений поверхности грунтов: – приливные явления в земной коре; – различное набухание грунтов при сезонных и эпизодических изменениях уровня грунтовых вод; – резкие перепады атмосферного давления при прохождении циклонов; – динамическая антропогенная нагрузка.

Нами было выполнено математическое моделирование амплитуд знакопеременных вертикальных движений поверхности над погребенными линзами торфов, возникающих под влиянием сезонных изменений уровня грунтовых вод и ожидаемых над подземными тоннелями просадок поверхности подземного пространства. Результаты моделирования совпали с зарегистрированными КРИ ПО значениями.

Заключение

Апробация обоих вариантов технологии спутниковых радиолокационных измерений вертикальных движений поверхности городской среды – КРДИ и КРИ ПО позволяет сделать следующие выводы:

1. Используемые методики КРДИ и КРИ ПО в условиях Санкт-Петербурга позволяют картографировать вертикальные изменения высот, превышающие, соответственно, ± 14 мм и $\pm 3,5$ мм.

2. Результаты технологии КРИ ПО показывают, что в Санкт-Петербурге в областях развития слабых грунтов и/или осложнений инженерно-геологических условий наблюдаются «высокочастотные» знакопеременные вертикальные движения поверхности городской среды, достигающие десятков миллиметров. Причиной подобных движений могут быть сезонные вариации глубины уровня грунтовых вод и ряд других природных и антропогенных факторов.

3. В условиях Санкт-Петербурга, контроль деформаций городской среды целесообразно проводить с использованием как технологии КРДИ, так и КРИ ПО, так как, последняя, в силу заложенного в нее принципа, не позволяет обнаруживать «катастрофические» явления (снос зданий, появление строительных котлованов и т.п.). В то же время КРИ ПО дает возможность наблюдения за кинематикой поверхности городской среды, что чрезвычайно важно для контроля за сохранностью памятников исторического наследия города.

Литература

1. *Gens R. and J.L. Van Genderen.* SAR interferometry - issues, techniques, applications. International Journal of Remote Sensing // 1996. V. 17. No 10. P. 1803-1835.
2. *Amelung F., Galloway D.L., Bell J.W., Zebker H.A., and Laczniak R.J.* Sensing the ups and downs of Las Vegas--InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation // Geology. 1999. V. 27. P. 483-486.
3. *Cabral C. E., Dixon T., Zamora Sanchez, O., Diaz Molina O., Correa Mora F.* Ground subsidence in Mexico City imaged by InSAR, GPS and gravimetry, Abstracts with Programs. Geological Society of America // 2003. V.35. No.4. P.77.
4. *Mouelic Le S., Raucoules D., Carnec C., King C.* A Least Squares Adjustment of Multi-temporal InSAR Data: Application to the Ground Deformation of Paris. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing // 2005. V.71. No. 2. P. 197-204.
5. *Liu G., Luo X., Chen Q., Huang D., Ding X.* Detecting Land Subsidence in Shanghai by PS-Networking SAR Interferometry. Sensors // 2008. No 8. P. 4725-4741.
6. *Perski Z., Leijen F.V., Hanssen R.* Applicability of PS InSAR for building hazard identification. Study of the 29 January 2006 Katowice exhibition hall collapse and the 24 February 2006 Moscow Basmanny market collapse // ESA ENVISAT Symposium, Montreux, Switzerland. 23-27 April 2007. <http://envisat.esa.int/envisatsymposium/proceedings/sessions/3B2/463385pe.pdf>
7. *Stramondo S., Bozzano F., Marra F., Wegmuller U., Cinti F.R., Moro M., Saroli M.* Subsidence Induced by Urbanisation in the City of Rome Detected by Advanced InSAR Technique and Geotechnical Investigations. Remote Sensing of the Environment // June 16. 2008. V. 112. No. 6. P. 3160-3172.
8. *Tesauro M., P. Berardino R. Lanari E. Sansosti, and others,* Urban subsidence inside the city of Napoli (Italy) observed by satellite radar interferometry. Geophysical Research Letters // 2000. V. 27. No. 13. P. 1961-1964.
9. *Aktar M. Browitt C.* Vulnerability Mapping Istanbul. ESA, GMES, http://www.terrafirma.eu.com/Documents/presentations/Microsoft Powerpoint - PSI_Istanbul_Update_M_Aktar_C_Bro.pdf. 6 p.
10. *Amanti M., Cesi C., Chiessi V.* And others. Subsidence and uplift in Rome and surroundings as revealed by satellite SAR images // 2007 International Geohazards Week. ESRIN, Frascati (Italy). 5-9 November 2007. 2007. <http://earth.esa.int/cgi-bin/confgeo7.pl?abstract=546>
11. A ground motion information service for Europe. Terrafirma atlas. http://www.terrafirma.eu.com/Documents/TERRAFIRMA_ATLAS.pdf. - P. 31
12. Инструкция по нивелированию I, II и III классов. М. Недра. 1990 г.
13. *А.С. Богданов.* Методика картирования эволюций гидрографической сети Санкт-Петербурга на основе геоинформационных технологий // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидат технических наук. ВИКА А. Ф. им А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. 2007г.
14. *Rodriguez, E., and Martin J.* Theory and design of interferometric SARs // Proc. IEEE. 1992. V. 139. P. 147-159.
15. *Zebker H., and Villasenor J.* Decorrelation in interferometric radar echoes. IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing // 1992. V. 30. P. 950-959.
16. *Hellwich O.* Basic Principles and Current Issues of SAR Interferometry // In ISPRS Joint Workshop "Sensors and Mapping from Space 1999", Hannover, No 18 in Publications of the Institute for Photogrammetry and Engineering Surveying of the University Hannover. 1999. <http://citeserx.ist.psu.edu/viewdoc/summary;jsessionid=A9C32F311B4C93E3A0C24148F2066009?doi=10.1.1.42.2558>.
17. *Biirgmann, R., P. Rosen A., and Fielding E. J.* Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation. Annual Reviews of Earth Planetary Science. 2000. V. 28. P. 169-209.
18. *Hanssen R. F.* Subsidence monitoring using contiguous and PS-InSAR: Quality assessment based on precision and reliability // In 11th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 23-28 May, 2003. P. 8. <http://enterprise.lr.tudelft.nl/doris/Literature/hanssen03a.pdf>
19. *Паньжин А.А.* <http://www.igd.uran.ru/geomech/station/about.htm>.
20. *Yang Zhigen, Zhu Wen-Yao, Shum C. K. and Shu Feng-Chun.* Determination of the regional deformation rates of Shanghai and Kashima VLBI stations based on ITRF97. Chinese Astronomy and Astrophysics // 2002. V. 26/ Issue 4. P. 497-502.

21. *Yang Zhigen, Bérubé Mario, Searle Anthony.* Relative Deformations between Co-located VLBI Stations and Comparisons with VTRF2003 // IVS General Meeting Proceedings. 2004. <http://ivs.nict.go.jp/mirror/publications/gm2004/Yang1/>
22. *Patias R. E.* Estimation of crustal vertical movements due to atmospheric loading effects by GPS observations. *Rev. Bras. Geof.* // 2007. V. 25. No.1. P. 45-50.
23. *Пексельный В.И., Малов Н.Д., Дверницкий Б.Г.* Роль геодинамического фактора в развитии аварийной ситуации в Петербургском метро. *Разведка и охрана недр* // 7-8, июль-август, 1998. С. 60-62.
24. *Козин Е.Г.* Геомеханическое обоснование способов поддержания перегонных тоннелей метрополитена // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. С-Петербург. 2004 г. - С.20.

Vertical Sign-Variable Movements of Land Surface According Satellite Radar Survey Data (On an Example of Saint-Petersburg)

V.I.Gornyy ¹, S.G.Kritsuk ¹, I.Sh.Latypov ¹, A.G.Olovyannyy ², A.A.Trinin ¹

*¹Scientific Research Center for Ecological Safety, Russian Academy of Sciences
18, Korpusbaya Str., Saint-Petersburg, 197110, Russia*

E-mail: v.i.gornyy@ecosafety-spb.ru

²Institute of Environmental Geology

St. Petersburg Division

E-mail: agolov2009@hge.pu.ru

The Committee for State Control and Protection of Historical and Cultural Landmarks of St.-Petersburg has supported the researches, directed on an estimation of efficiency of satellite radar differential interferometry (SRDI) application on a cultural heritage protection. Within this researches, maps of surface deformations for the period of the last 10 years were compiled on the base of ERS-1,2 and ALOS(PALSAR) satellite radar data by using techniques of SRDI and satellite radar interferometry of permanent scatters (SRI PS). The errors of vertical deformations were estimated on the bases of repeated radar satellite surveys. The satellite data were compiled with the results of standard repeated leveling for the period of 1980-2003. It was observed the periodic and episodic oscillations of land surface with amplitude of few tenths of millimeters. Few hypotheses were built to explain such vertical land surface movements. Two of them were verified by mathematical simulations. As the result, the basic principles of Saint-Petersburg territory zoning according the risk of historical building deformation were suggested.

Keywords: Satellite, Radar, Interferometry, Ground, Sign-Variable Land Surface movements, Buildings, Deformations.