

## **Влияние условий проведения радарной съемки на точность измерений динамики урбанизированной территории методом постоянных отражателей**

А. И. Захаров<sup>1</sup>, А.А.Феокистов<sup>2</sup>, М.А.Гусев<sup>2</sup>, П.В. Денисов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Фрязинский Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 141190, пл. Введенского, 1, Фрязино, Московская область, [aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru](mailto:aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru)

<sup>2</sup>Научный центр оперативного мониторинга Земли АО “Российские космические системы”, 127490, Москва, ул. Декабристов, владение 51, строение 25

*На примере города Москвы исследованы условия выполнения съемки урбанизированной территории радаром L-диапазона PALSAR (метеорология в день съемки, ошибки знания высот отражающих поверхностей, и др.) на точность измерений потенциальных смещений зданий и сооружений методом постоянных отражателей. На примере корпуса гостиницы Дельта показано, что точность измерения подвижек здания достигает 1 см. Точность снижается до 2-2.5 см при съемке зимой, а также в дождливые дни.*

*An influence of radar observation conditions (meteorology, radar observation mode surface heights data errors, etc.) on the measurements of scattering surface stability in the city of Moscow by means of persistent scatterers technique using L-band PALSAR data. It is shown that the accuracy of the measurements of the hotel Delta building probable displacements is about 1 cm. The accuracy decreases till 2-2.5 cm in rainy and winter days of observations.*

Метод постоянных отражателей является модификацией метода радарной интерферометрии и применяется в условиях сильной временной декорреляции отраженных сигналов на радиолокационных снимках земной поверхности, полученных с большим разнесением во времени. Основу метода составляет идея использования «постоянных отражателей» - объектов, сохраняющих стабильность уровня отражения и положения фазового центра отраженного сигнала. Наблюдаемые на территории города постоянные отражатели – это, как правило, яркие точечные объекты, изображение которых сформировано в результате отражения сигнала конструкциями типа уголкового отражателей [1]. Постоянные отражатели выявляют с помощью статистического анализа сигналов из длинных временных серий снимков, полученных в интерферометрической геометрии съемки.

Экспериментальным материалом в данной работе являются снимки японского космического РСА L-диапазона PALSAR, проводившего съемку территории Москвы в период с 2006 по начало 2011 г. В данной работе используются снимки, полученные в режимах FBS34.3 и FBD34.3 на согласованной горизонтальной поляризации. Угол обзора при работе РСА в этих режимах равен 34.3°, наклонная дальность до центра кадра 847 км, разрешение по наклонной дальности в первом случае равно 4.68 м, а во втором — 9.36 м. Список из 29 сеансов съемки с информацией о дате съемки, размере перпендикулярной компоненты интерферометрической базы, режиме съемки и погодных условиях приведен в таблице 1. Характерной особенностью этой серии снимков РСА PALSAR, как видно из таблицы, было монотонное изменение величины интерферометрической базы (расстояние между орбитами, с которых происходила съемка опорного сеанса от 21.09.2007 г и парных сеансов) от -3800 до 4000 м. Причиной этого был дрейф орбитальных параметров космического аппарата со скачкообразным изменением базы в 2008 году в результате коррекции орбиты (см. рис. 1).

Предварительная обработка данных в виде формирования стека совмещенных дифференциальных интерферограмм была выполнена с помощью модуля постоянных отражателей программного пакета SARscape, особенности работы с которым, а также рекомендации по выбору параметров обработки описаны в [2,3]. В качестве опорного сеанса, к которому были перестроены и с которым совмещены остальные 28 парных сеансов, был выбран сеанс от 21.09.2007 г.

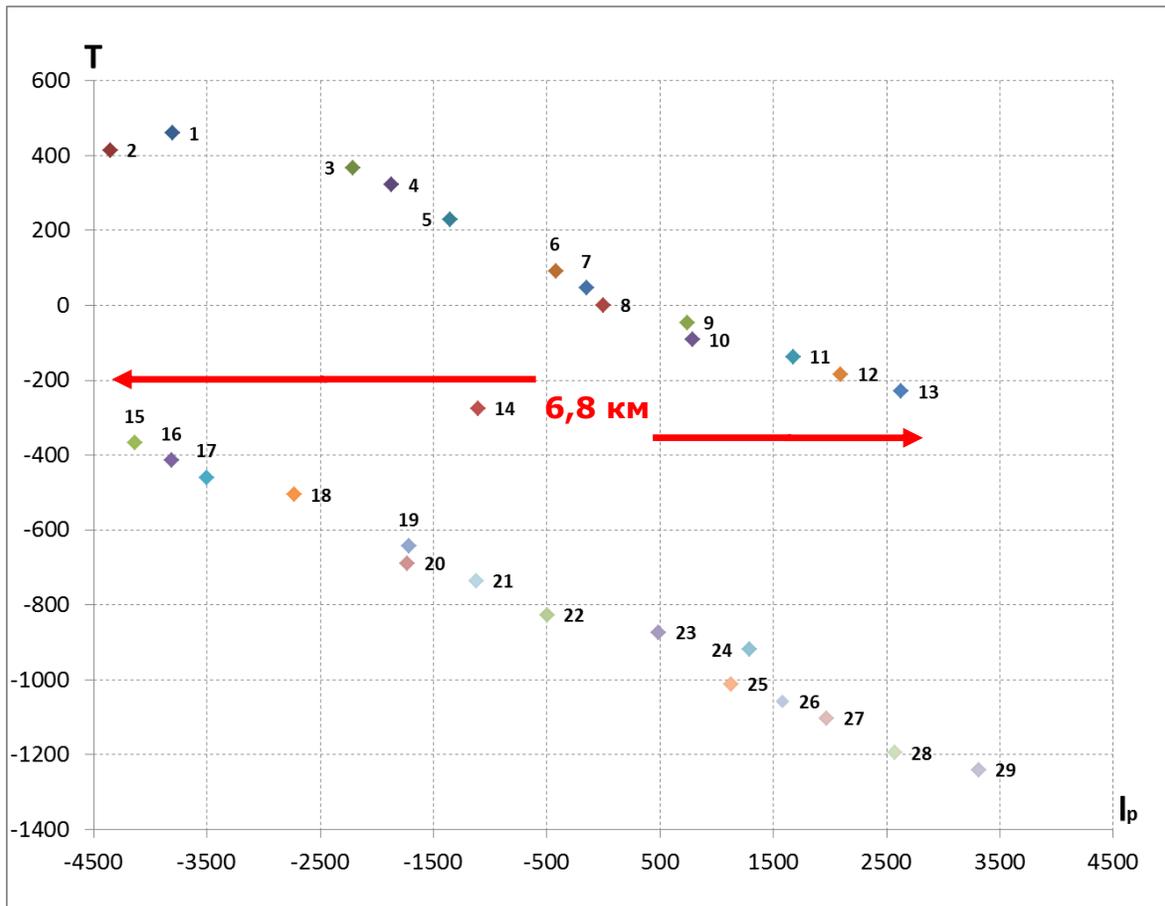
Таблица 1. Сведения о сеансах съемки и метеоусловиях в дни съемки.

№ п/п	Даты съемки	Перпендикулярные компоненты базовых линий $l_p$ , м	Временные интервалы между съемками опорного и парного изображений, дни	Режимы съемки	Среднесуточная температура, осадки
1	18.06.2006	-3804,15	460	FBS	+20
2	03.08.2006	-4354,63	414	FBS	+18, дождь
3	18.09.2006	-2213,04	368	FBS	+10,8
4	03.11.2006	-1867,29	322	FBS	-4 Морось
5	03.02.2007	-1355,95	230	FBS	-12
6	21.06.2007	-420,78	92	FBD	+16
7	06.08.2007	-146,24	46	FBD	+20
<b>8</b>	<b>21.09.2007</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>FBD</b>	<b>+9</b>
9	06.11.2007	739,49	-46	FBS	-4, мокрый снег
10	22.12.2007	786,96	-92	FBS	+1, дождь
11	06.02.2008	1676,37	-138	FBS	-1, мокрый снег
12	23.03.2008	2096,09	-184	FBS	+2
13	08.05.2008	2630,08	-230	FBS	+5
14	23.06.2008	-1106,36	-276	FBD	+17
15	23.09.2008	-4130,96	-368	FBD	+8
16	08.11.2008	-3807,23	-414	FBS	-1
17	24.12.2008	-3500,81	-460	FBS	-5, снег
18	08.02.2009	-2728,47	-506	FBS	+0, туман
19	26.06.2009	-1716,13	-644	FBD	+15, дождь
20	11.08.2009	-1728,11	-690	FBD	+18
21	26.09.2009	-1121,87	-736	FBD	+9, дождь
22	27.12.2009	-494,24	-828	FBS	+2, мокрый снег
23	11.02.2010	489,71	-874	FBS	-11
24	29.03.2010	1294,08	-920	FBS	+4
25	29.06.2010	1125,11	-1012	FBD	+20
26	14.08.2010	1579,99	-1058	FBD	+25
27	29.09.2010	1971,98	-1104	FBD	+6
28	30.12.2010	2569,74	-1196	FBS	-7
29	14.02.2011	3311,12	-1242	FBS	-19

В соответствии с [2], например, разность фаз на интерферограммах  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  является функцией  $\Delta\varphi_i(\Delta h)$  вариаций рельефа поверхности  $\Delta h$ , мелкомасштабных

площадных смещений поверхности (динамика поверхности)  $\Delta\varphi_s$  за время между съемками, атмосферных флуктуаций электрической длины пути сигнала радара  $\Delta\varphi_a$ , шумов приемной системы  $\Delta\varphi_n$  и неизвестной начальной разности фаз  $\Delta\varphi_0$ :

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_t + \Delta\varphi_s + \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_n + \Delta\varphi_0. \quad (1)$$



**Рис. 1.** Распределение сеансов в зависимости от величины перпендикулярных компонент базовых линий  $l_p$  и временных интервалов  $T$  между опорной и парнымисъемками.

Сотношение, описывающее чувствительность интерферометрической разности фаз к вариациям высот рельефа, согласно [4], можно записать так:

$$d\Delta\varphi_t = 4\pi(\lambda r \sin \alpha)^{-1} l_p d\Delta h. \quad (2)$$

Здесь  $l_p = l_i \sin(\alpha_i - \alpha)$  - перпендикулярная линии визирования компонента пространственной интерферометрической базы (расстояния между точками пространства, которых происходила съемка снимков интерферометрической пары),  $\lambda$  - длина волны сигнала радара,  $r$  - наклонная дальность,  $\alpha$  - угол падения радиоволны на поверхность в кадре съемки. Из этого выражения можно получить такую важную характеристику интерферограммы как интервал неоднозначности по высоте  $h_a$  - перепад высот,

приводящий к изменению разности фаз на интерферограмме на  $2\pi$ . Приняв  $d\Delta\varphi_t$  равным  $2\pi$ , получим

$$h_a = \lambda r(2l_p)^{-1} \sin \alpha \quad (3)$$

Выделение компоненты  $\Delta\varphi_s$ , описывающей динамику подстилающей поверхности за время между съемками, является задачей дифференциальной радарной интерферометрии. Разность фаз  $\Delta\varphi_s$  связана с изменением разности наклонных дальностей из-за смещения поверхности в направлении линии визирования  $\Delta s$  следующим соотношением:

$$\Delta\varphi_s = -4\pi\lambda^{-1}\Delta s. \quad (4)$$

На рис. 2. приведен фрагмент амплитудного изображения района станции метро Партизанская с кольцевым прудом посередине. В левой части находится гостиничный комплекс Измайловский, состоящий из 30-этажных зданий высотой порядка 80 м. На совокупности ярких точек, формирующих радарное изображение гостиницы Дельта, красными крестиками отмечено положение массива выявленных на здании постоянных отражателей.

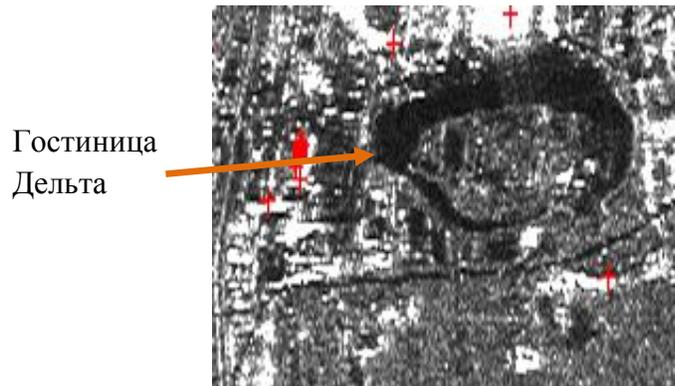


Рис. 2. Амплитудное изображение района гостиницы Дельта.

Первичным критерием выявления постоянных отражателей в данной работе был уровень стабильности отраженного сигнала [1], выражаемый в единицах дисперсии амплитуды сигнала на интерферограмме:

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A}, \quad (5)$$

где  $\mu_A$  - среднее значение амплитуды сигнала в пикселе по массиву совмещенных интерферограмм,

$\sigma_A$  - среднеквадратичное отклонение амплитуды сигнала.

Типовым пороговым уровнем дисперсии амплитуды является 0.2-0.3, порог 0.3 был использован для отбора постоянных отражателей в данной работе. Для 7 выявленных на корпусе гостиницы постоянных отражателей из 28 на рис. 3 и 4 ниже приведены распределение во времени удельной эффективной площади рассеяния сигнала (УЭПР, или  $\sigma^0$ ) и значений интерферометрической разности фаз, пересчитанных в радиальные смещения постоянных отражателей по формуле (4).

На рис. 3 ниже показаны значения УЭПР для 7 постоянных отражателей, выбранных в соответствии с критерием (5), а на рис. 4 - история радиальных псевдо смещений для 7

постоянных отражателей на корпусе гостиницы в 2006-2011 гг. Смещения на рис. 4 нельзя считать истинными, поскольку, согласно (1), они могут содержать ошибки различного рода. Однако, можно исключить влияние атмосферных неоднородностей на измерения и принять в (1)  $\Delta\varphi_a=0$ , поскольку постоянные отражатели расположены весьма близко.

Наблюдаемый на графике рис. 4 тренд со скачком в районе сеанса 23.09.2008, очевидно, коррелирует с изменением величины компоненты  $l_p$  базовой линии с рис. 1.

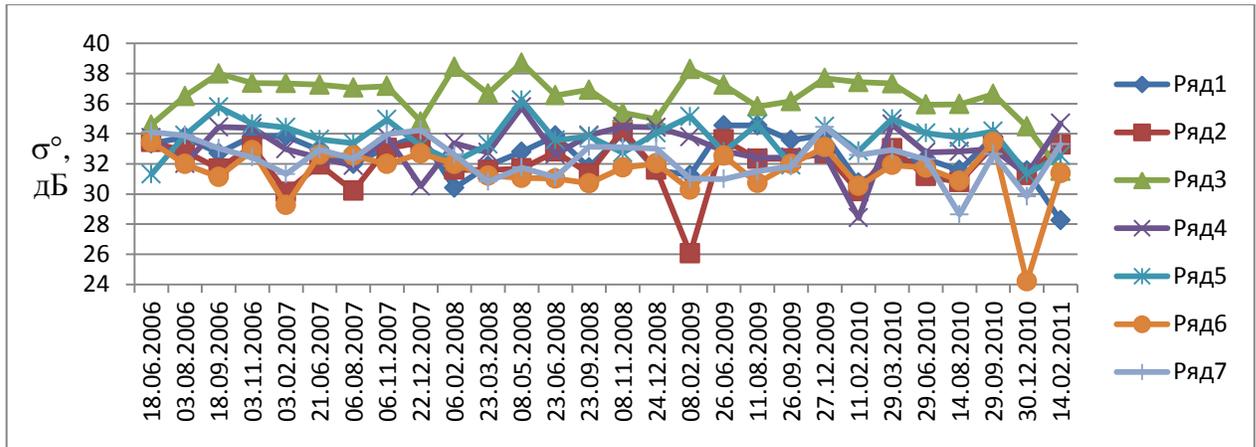


Рис. 3. УЭПР для 7 постоянных отражателей на корпусе гостиницы в 2006-2011 гг.

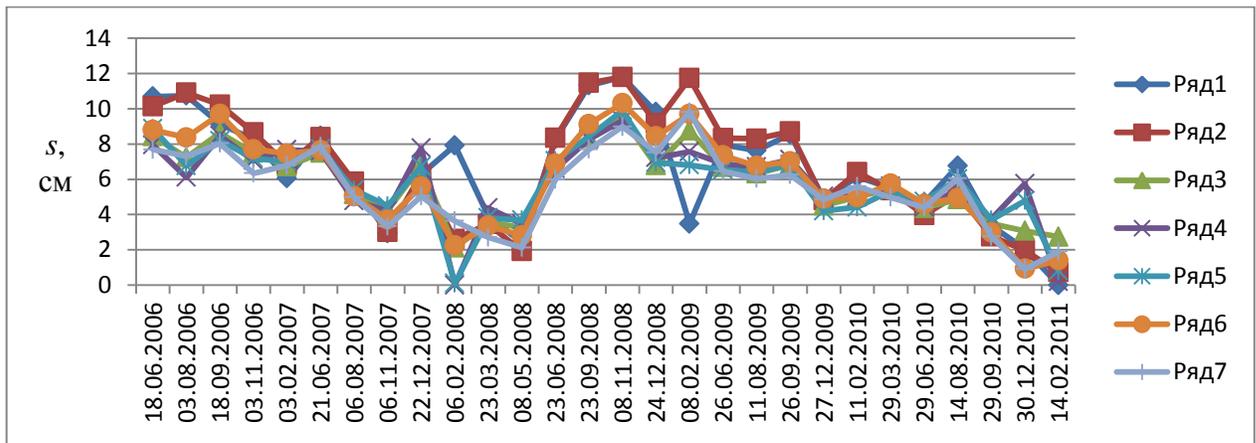


Рис.4. История радиальных псевдосмещений для 7 постоянных отражателей на корпусе гостиницы в 2006-2011 гг.

Согласно (2), это может быть проявлением топографии поверхности на интерферограмме вследствие ненулевого значения высот  $\Delta h$ . В нашем случае, при построении стека дифференциальных интерферограмм мы пытались скомпенсировать топографическую фазу, используя информацию о рельефе из проекта SRTM, однако коррекция, очевидно, оказалась недостаточно точной. Причиной этого могло быть недостаточно высокое разрешение или точность цифровой модели рельефа (ЦМР), либо несовпадение положения фазовых центров постоянных отражателей в L-диапазоне (данные PALSAR) и фазовых центров сигналов X-диапазона, использовавшихся для построения ЦМР (данные SRTM).

Обозначим нескомпенсированную компоненту высоты рельефа как  $\Delta h_e$ . Тогда, с учетом (4), для данной высоты неоднозначности  $h_{ai}$  можно записать такое соотношение:

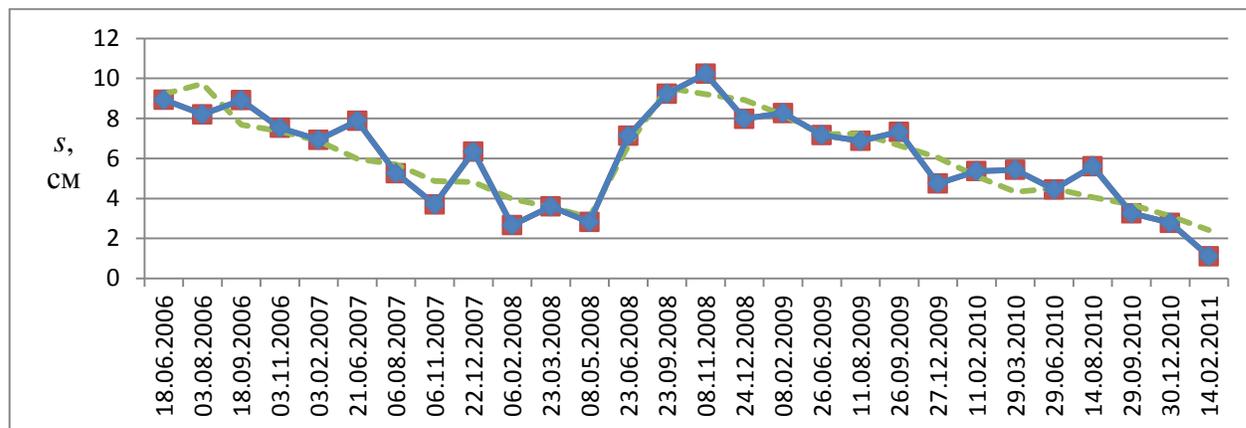
$$\frac{\Delta h_e}{h_{ai}} = \frac{\Delta \varphi_e - \Delta \varphi_0}{2\pi} = \frac{s_i - s_e}{0.5\lambda}, \quad (6)$$

где  $\Delta \varphi_0$  - неизвестная начальная фаза,

$s_e$  – неизвестная константа,

$s_i$  - среднее значение смещения  $i$ -ом сеансе, рис. 2.

Методом наименьших квадратов для всех 28 сеансов получим, что нескомпенсированная компонента  $\Delta h_e = -4.9$  м (высота отражения постоянных отражателей ниже, чем высота соответствующей точки поверхности на ЦМР SRTM), константа  $s = 5.57$  см. На рис. 5 приведены график среднего по 7 постоянным отражателям псевдосмещения корпуса Дельта и оценка вклада топографической ошибки. На рис. 6 дан график смещений корпуса за вычетом вклада топографической ошибки и ошибки  $s_e$ , обусловленной неизвестной начальной фазой  $\Delta \varphi_0$ .



**Рис. 5. Усредненные по 7 отражателям значения псевдосмещений (сплошная синяя линия) и оценка вклада топографической ошибки (прерывистая зеленая линия).**

Следует отметить высокое качество коррекции топографической ошибки, если предположить ошибку  $\Delta h_e = -4.9$  м при коррекции влияния высоты корпуса на интерферометрическую фазу с помощью цифровой модели рельефа SRTM. Это значение ошибки находится в хорошем соответствии с непосредственными измерениями высоты поверхности на ЦМР SRTM и значениями высот, выведенных из значений фазы на интерферограмме PALSAR для пикселей, соответствующих положению постоянных отражателей. Согласно данным ЦМР SRTM, высота поверхности в месте расположения постоянных отражателей относительно близлежащей ровной поверхности примерно равна 12 м (при высоте гостиницы 80 м), а по данным интерферометрических измерений PALSAR выбранные нами постоянные отражатели находятся на высоте 7.6 м, что должно было привести к ошибке коррекции высоты -4.4 м.

На рис. 6 отсутствует какой-либо линейный тренд, который мог быть вызван монотонным смещением (просадками) корпуса гостиницы на интервале 2006-2011 гг. Наблюдаемые на графике выбросы обусловлены ошибками измерений, вызванными,

например, радиотехническими шумами аппаратуры радара. Ошибка измерений смещений корпуса как совокупности из 7 постоянных отражателей составила 0.9 см. На графике не выявлена зависимость уровня ошибок измерений положения корпуса гостиницы на пятилетнем интервале наблюдений от режима съемки радара и сезона съемки.

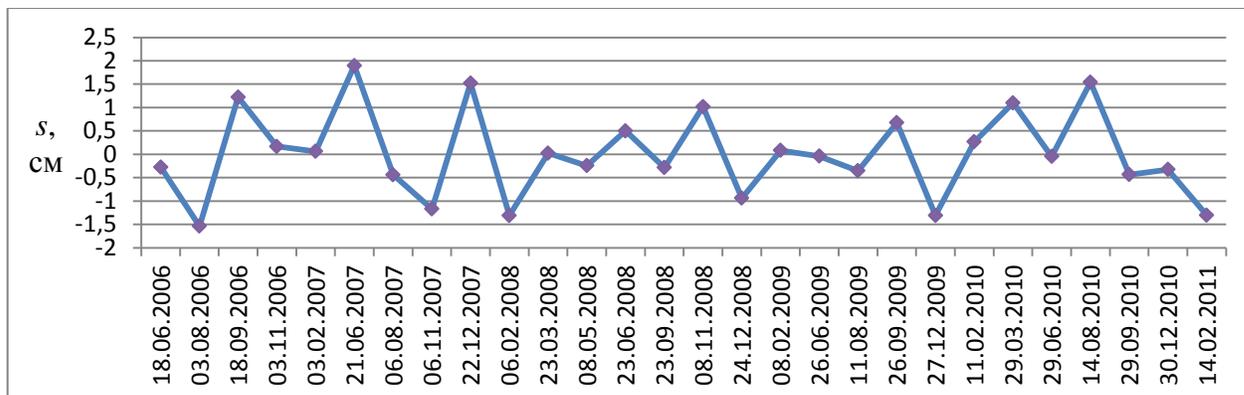


Рис. 6. Средние значения смещений корпуса Дельта за вычетом топографической ошибки.

На рис. 7 представлены среднеквадратичные отклонения смещений 7 постоянных отражателей по данным с рис. 4. При доминирующем значении ошибок измерений 0.5-1 см, наблюдаются выбросы уровня 2-2.5 см. Съемка 03.08.2006 проводилась в сильный дождь, а съемки 06.02.2008, 02.08.2009 и 30.12.2010 в зимнее время года, что и было наиболее вероятной причиной увеличения ошибок измерений положения постоянных отражателей на корпусе гостиницы.

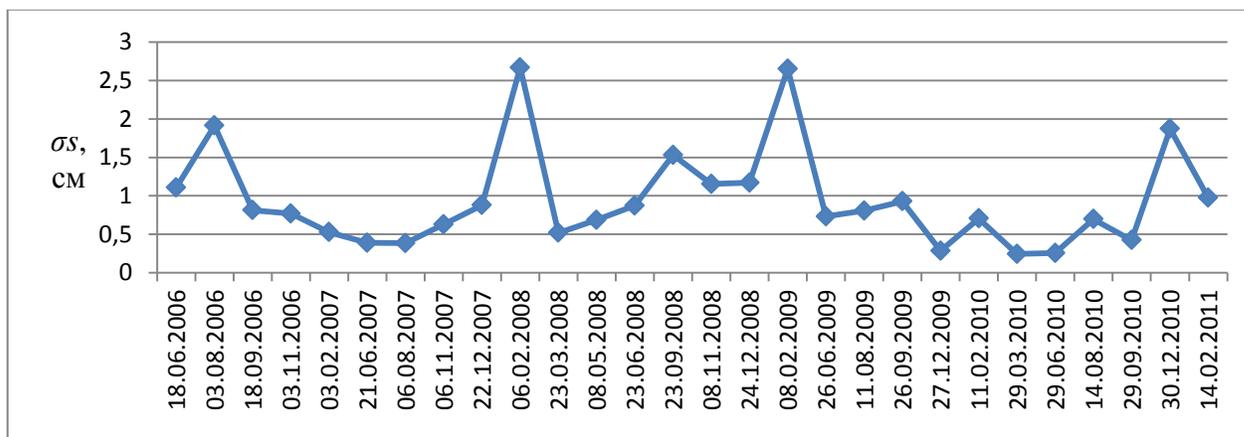


Рис. 7. Среднеквадратическое отклонение смещений для 7 постоянных отражателей с рис. 4, выявленных на корпусе гостиницы Дельта.

## Выводы

Метод постоянных отражателей является эффективным средством мониторинга динамики подстилающей поверхности преимущественно на урбанизированных территориях, где выявляются в большом количестве стабильно отражающие объекты, называемые постоянными отражателями и работающие по принципу уголкового отражателя. На примере гостиницы Дельта (район метро Партизанская) показано влияние

условий измерения возможных смещений корпуса гостиницы методом постоянных отражателей на точность измерений.

Важным фактором при измерении подвижек поверхности методом дифференциальной интерферометрии является требование высокой точности знания высоты рельефа отражающей поверхности. В рассмотренном примере, для больших значений интерферометрической базы радара PALSAR, выявлены значительные ошибки измерения подвижек, обусловленные неточным знанием положения по высоте фазового центра использованных постоянных отражателей. Необходимым является этап уточнения положения постоянных отражателей по высоте.

Долговременная стабильность положения корпуса гостиницы оказалась равной 0.9 см. Вероятно, что этот уровень стабильности обусловлен в первую очередь шумами аппаратуры и меняющимися условиями измерения, а не стабильностью положения самого корпуса.

Точность измерения положения отдельных постоянных отражателей при отражательных свойствах отражателей 30-30 дБ составляет 0.5-1 см. Точность снижается до 2-2.5 см в дождливые и зимние дни съемки.

### **Литература**

1. Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39, pp. 8-20.
2. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование зависимости результатов обработки радиолокационных данных ДЗЗ от параметров обработки. Часть 1. Ключевые моменты метода постоянных рассеивателей // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2014. №12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/5/text.html>
3. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование зависимости результатов обработки радиолокационных данных ДЗЗ от параметров обработки. Часть 2. Экспериментальные результаты // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2014. №12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/6/text.html>
4. Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. М.: КРАСАНД, 2012. 248 с.