

УДК 528.71

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
МЕТОДА МАЛЫХ БАЗОВЫХ ЛИНИЙ НА ПРИМЕРЕ
МОДУЛЯ SBAS ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА SARSCAPE
И ДАННЫХ PCA ASAR/ENVISAT И PALSAR/ALOS.
ЧАСТЬ 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

А. А. Феоктистов¹, А. И. Захаров², М. А. Гусев¹, П. В. Денисов¹

¹ Научный центр оперативного мониторинга Земли ОАО “Российские космические системы”

² Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН

Статья получена 25 августа 2015 г.

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований возможностей метода малых базовых линий, полученные при обработке длинных временных серий изображений PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS и результатов подспутниковых GPS-измерений с помощью модуля SBAS программного пакета SARscape.

Ключевые слова: метод малых базовых линий, SBAS, PCA, ASAR/ENVISAT, PALSAR/ALOS, SARscape, граф связи, атмосферный фазовый экран, ЦМР.

Abstract. Results of experimental studies of small baselines technique are presented. SAR ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS data sets were processed by SBAS module of SARscape software package, the sub-satellite GPS measurements were involved in the processing and analysis chain also.

Key words: small baselines technique, SBAS, SAR, ASAR/ENVISAT, PALSAR/ALOS, SARscape, connection graph, atmospheric phase screen, DEM.

1. Введение

В работе представлены результаты комплексных экспериментальных исследований возможностей метода малых базовых линий (SBAS) [1-3], выполненных с использованием модуля SBAS программного пакета SARscape

на примере обработки тестовых наборов данных двух радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) с привлечением данных подспутниковых GPS-измерений.

2. Входные данные

Использованы две длинные временные серии:

- 34 фрагмента изображений (размером $16 \times 15,3 \text{ км}^2$) РСА ASAR/ENVISAT (С-диапазон, длина волны излучения 5,6 см), полученных на нисходящих орбитах в период с 04.09.2006 по 08.09.2010; формат данных Single Look Complex (SLC); режим съемки IS2; VV поляризация сигнала; пространственное разрешение на земной поверхности 30 м;

- 23 фрагмента изображений (также размером $16 \times 15,3 \text{ км}^2$) РСА PALSAR/ALOS (L-диапазон, длина волны излучения 23,6 см), полученных на нисходящих орбитах в период с 26.08.2006 по 22.10.2010; формат данных – SLC; канал HH; режим съемки с одной/двумя поляризациями (FBS/FBD); пространственное разрешение на земной поверхности 7/14 м, соответственно.

Дополнительно использованы результаты подспутниковых GPS-измерений для одной точки, находящейся в пределах области "покрытия" земной поверхности изображениями РСА. Данные представляют собой тестовый массив, поставляемый вместе с пакетом SARscape. Территория съемки – префектура Тиба (Япония). На этой территории расположено несколько участков с проседанием и подъемом почвы. Смещения земной поверхности вызваны добычей газа и закачкой воды. В качестве опорной цифровой модели рельефа (ЦМР) использована ЦМР SRTM.

Таблица 1 описывает состав временных серий изображений РСА ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS.

3. Формирование графов связи

Опорные изображения временных серий выбраны в автоматическом режиме. Пороговые значения для нормальных компонент базовой линии установлены равными 50% от критических величин и равны, соответственно,

772 м (PCA ASAR/ENVISAT) и 6182/4637/3104 м (PCA PALSAR/ALOS; интерферометрические пары из FBS-FBS/FBS-FBD/FBD-FBD изображений, соответственно).

Таблица 1 – Состав временных серий изображений

	ASAR/ENVISAT		PALSAR/ALOS
1	Asar_20060904_slc	1	Palsar_FBD_20060826_slc
2	Asar_20061009_slc	2	Palsar_FBD_20061011_slc
3	Asar_20061113_slc	3	Palsar_FBD_20061126_slc
4	Asar_20061218_slc	4	Palsar_FBD_20071014_slc
5	Asar_20070122_slc	5	Palsar_FBD_20071129_slc
6	Asar_20070507_slc	6	Palsar_FBD_20081201_slc
7	Asar_20070611_slc	7	Palsar_FBS_20070226_slc
8	Asar_20070716_slc	8	Palsar_FBS_20070829_slc
9	Asar_20070820_slc	9	Palsar_FBS_20080531_slc
10	Asar_20070924_slc	10	Palsar_FBS_20080716_slc
11	Asar_20071029_slc	11	Palsar_FBS_20080831_slc
12	Asar_20071203_slc	12	Palsar_FBS_20081016_slc
13	Asar_20080107_slc	13	Palsar_FBS_20090116_slc
14	Asar_20080211_slc	14	Palsar_FBS_20090603_slc
15	Asar_20080317_slc	15	Palsar_FBS_20090719_slc
16	Asar_20080421_slc	16	Palsar_FBS_20090903_slc
17	Asar_20080526_slc	17	Palsar_FBS_20091019_slc
18	Asar_20080630_slc	18	Palsar_FBS_20091204_slc
19	Asar_20080804_slc	19	Palsar_FBS_20100421_slc
20	Asar_20080908_slc	20	Palsar_FBS_20100606_slc
21	Asar_20081013_slc	21	Palsar_FBS_20100722_slc
22	Asar_20081117_slc	22	Palsar_FBS_20100906_slc
23	Asar_20081222_slc	23	Palsar_FBS_20101022_slc
24	Asar_20090302_slc		
25	Asar_20090511_slc		
26	Asar_20090720_slc		
27	Asar_20090928_slc		
28	Asar_20091207_slc		
29	Asar_20100215_slc		
30	Asar_20100322_slc		
31	Asar_20100426_slc		
32	Asar_20100531_slc		
33	Asar_20100705_slc		
34	Asar_20100809_slc		

Пороговое значение для временной базовой линии установлено равным 500 дням для ASAR/ENVISAT и 600 дням для PALSAR/ALOS. Для получения более надежных результатов использовались только основные SBAS-наборы

(опция Allow Disconnected Blocks не активировалась) [1-3].

На выходе процедуры в координатах (1) дата съемки и (2) относительное положение (нормальные компоненты расстояния между орбитой съемки и орбитой опорного изображения серии) сформированы два графа связи, рис.1. Отображены вершины графа (соответствующие отдельным съемкам); ребра графа (связи) соответствуют парам изображений, для которых формируются интерферограммы [1-3]. Показано, что введенным пороговым ограничениям удовлетворяют 205 ASAR/ENVISAT-интерферограмм и 144 PALSAR/ALOS-интерферограммы.

Использован метод 3D-развертки фазы интерферограмм. Необходимо отметить, что в этом случае 3D-развертка проводится только для части интерферограмм (для которых на выходе формируются дополнительные графы связи); развертка фазы для остающихся связей выполняется стандартным методом 2D-развертки [3].

4. Формирование рабочей области

Ввиду отсутствия априорной информации о расположении зоны деформации земной поверхности в качестве рабочей области программы использовалась вся площадь фрагментов изображений.

5. Формирование интерферограмм

5.1. Параметры усреднения интерферограмм

На этапе формирования интерферограмм выбраны следующие значения параметров усреднения:

- PCA ASAR/ENVISAT (размеры пикселя на выходе процедуры формирования интерферограмм равны примерно 20 м):
 - для направления по дальности $\text{Range Looks} = 1$ (1)
 - для направления по азимуту $\text{Azimuth Looks} = 5$ (2)
- PCA PALSAR/ALOS (размеры пикселя на выходе процедуры формирования интерферограмм равны примерно 15 м):

для направления по дальности $\text{Range Looks} = 1$ (3)

для направления по азимуту $\text{Azimuth Looks} = 5$ (4)

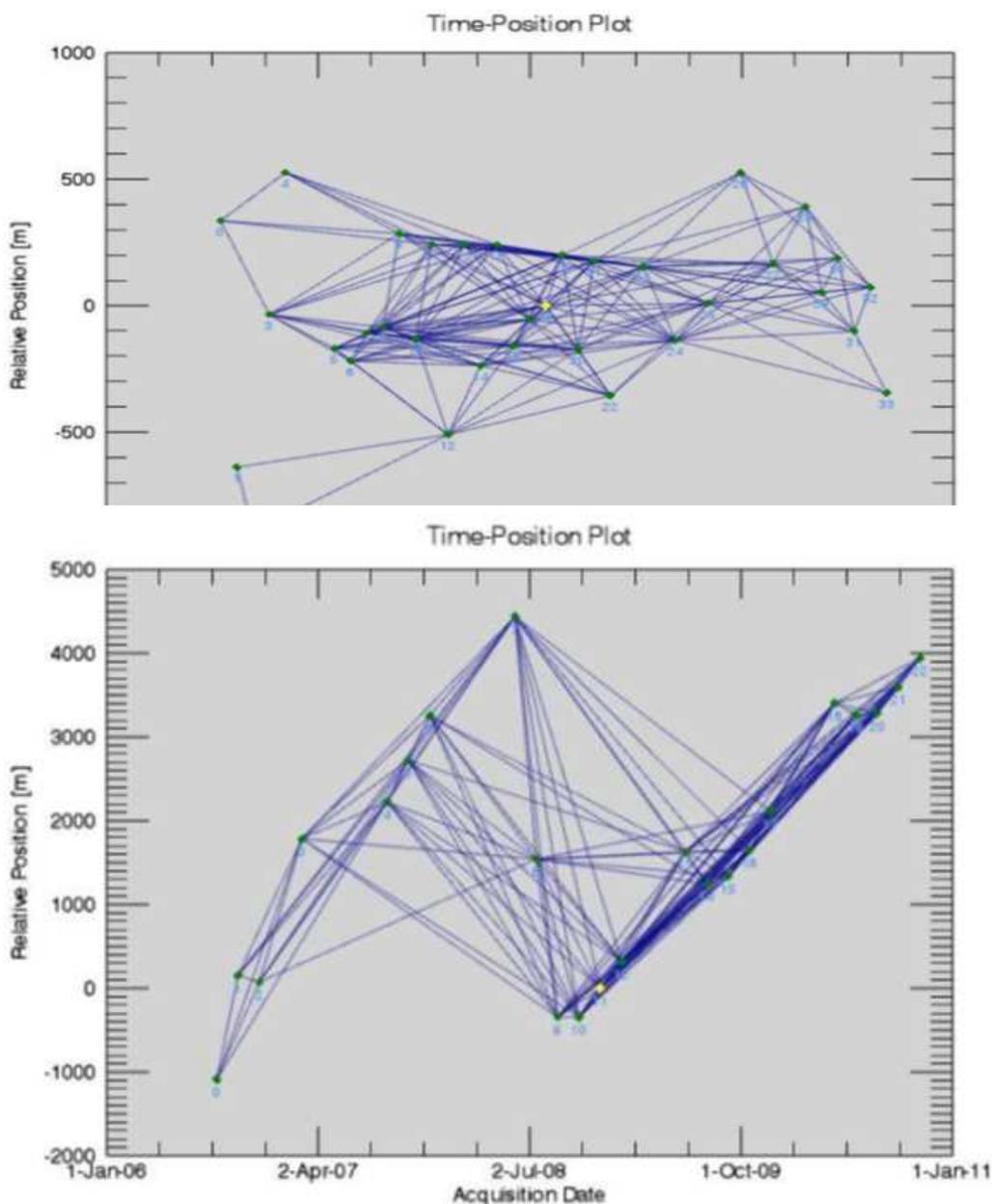


Рисунок 1 – Графы связи для временных серий изображений ASAR/ENVISAT (сверху) и PALSAR/ALOS (внизу).

Замечание. В соответствии с рекомендациями [1,3] выбором указанных значений обеспечены возможности формирования пикселей с почти квадратной формой с размерами, примерно равными худшему из разрешений каждого РСА по дальности и азимуту. "Подстройка" параметров усреднения (с учетом

различий характеристик FBS/FBD изображений) проводится автоматически – с сохранением размеров пикселей, установленных на основных изображениях серий [3].

5.2. Фильтрация интерферограмм

При проведении фильтрации интерферограмм использовался модифицированный фильтр Goldstein, который эффективен в случае зашумленных интерферограмм. Значения основных параметров: размер окна для расчета значений когерентности – 3×3 пикселей; размер квадратных фрагментов интерферограммы $d_{IW} = 64$ пикселям; $\alpha_{\min} = 0,3$; $\alpha_{\max} = 2,5$ [3-5].

5.3. Анализ свернутых интерферограмм

5.3.1. Погрешности в орбитальных параметрах. Интерферограммы с большим количеством параллельных интерференционных полос выявить не удалось, что, очевидно, свидетельствует об отсутствии заметных погрешностей в орбитальных параметрах (для иллюстрации на рис. 2 представлены "классические" примеры из [3] со специально смоделированными артефактами данного типа).

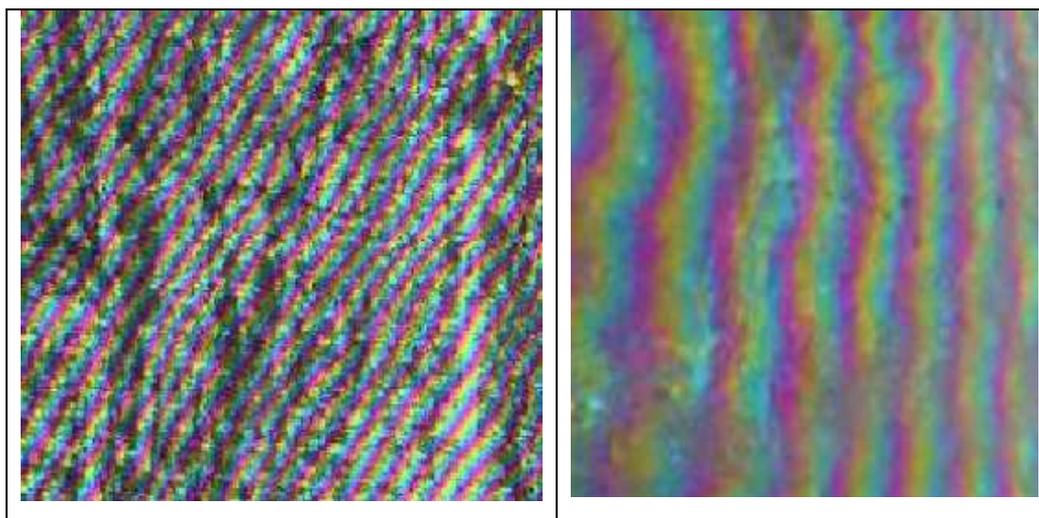


Рисунок 2 – Фрагменты интерферограмм с большим количеством параллельных интерференционных полос

5.3.2. *Ошибки совмещения в направлении наклонной дальности.* Выявлены интерферограммы с "размытостью" в направлении наклонной дальности (вследствие недостаточно корректной работы процедуры совмещения для этого направления); в качестве примера на рис. 3 приведены два фрагмента [1,3].

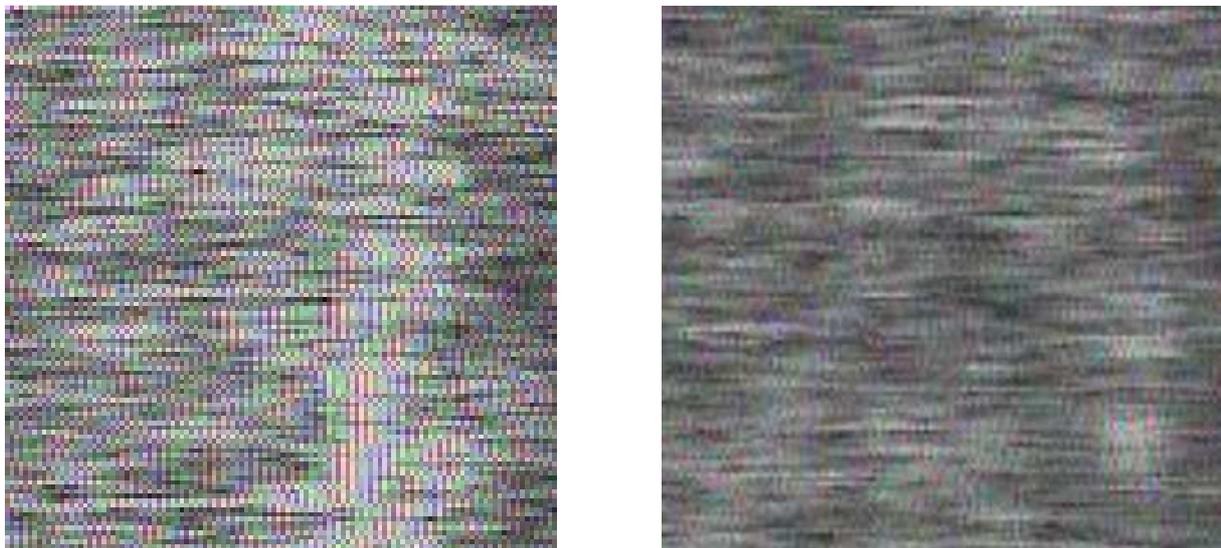


Рисунок 3 – Фрагменты интерферограмм с "размытостью" в направлении наклонной дальности

5.3.3. *Низкий уровень когерентности.* На рис. 4 показаны фрагменты интерферограмм с полным отсутствием четких интерференционных полос (низкий уровень когерентности), что является следствием слишком большой временной (в этом случае эффект чаще проявляется на фрагментах с изображением растительного покрова) и/или пространственной базовой линии (эффект проявляется более равномерно по всей площади интерферограммы) [1,3].

5.3.4. *Атмосферные артефакты.* Наконец, на рис. 5 представлены фрагменты интерферограмм с наиболее характерными признаками атмосферных фазовых искажений.

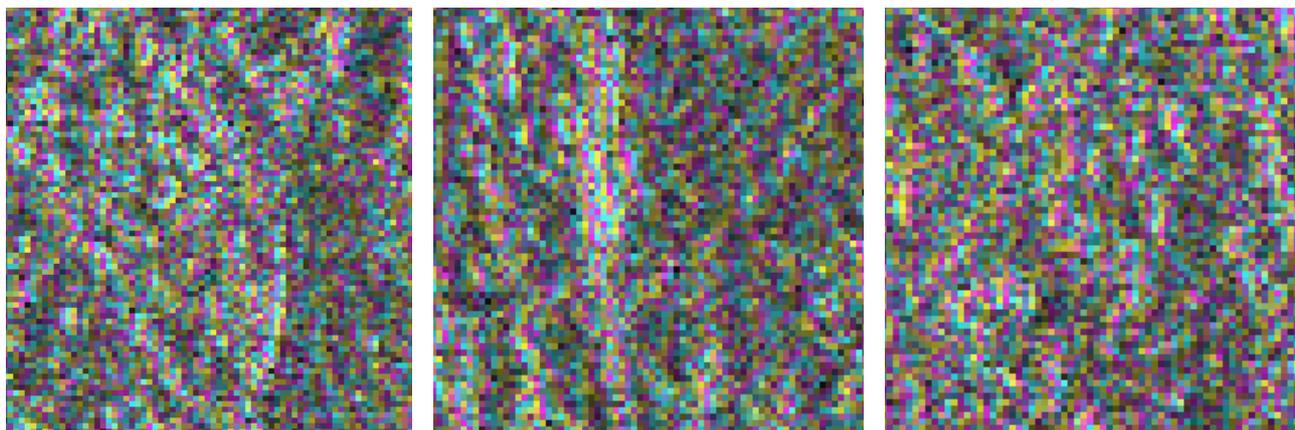


Рисунок 4 – Фрагменты интерферограмм с низким уровнем когерентности

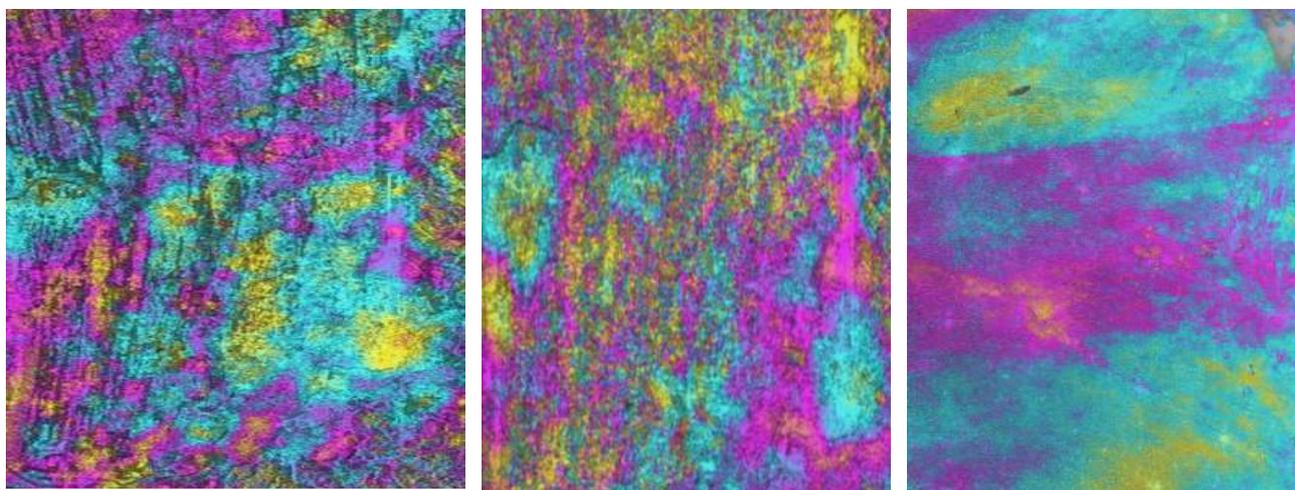


Рисунок 5 – Фрагменты интерферограмм с характерными признаками атмосферных фазовых искажений

5.3.5. *Предварительный поиск участков со смещением земной поверхности.* Известно, что предварительный поиск участков со смещением земной поверхности должен проводиться с использованием интерферограмм, имеющих общее опорное изображение, но со значительно различающимися временными базовыми линиями [1,3]. "Классические" примеры четкой идентификации четырех участков со смещением земной поверхности приведены на двух фрагментах интерферограмм из [3], рис. 6. На выбранных в рамках проведенного анализа фрагментах интерферограмм признаки смещений земной поверхности проявляются существенно менее четко, рис. 7.

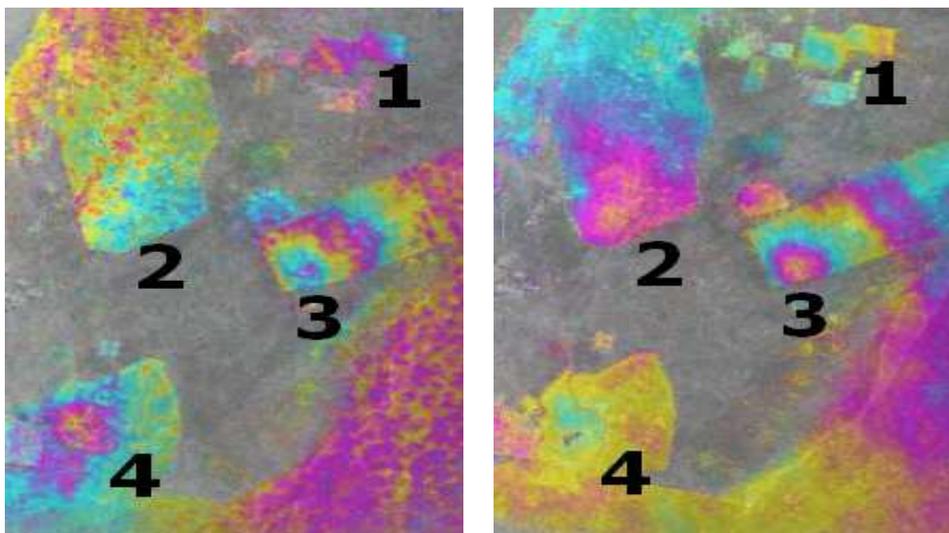


Рисунок 6 – Фрагменты интерферограмм с четкими признаками смещений земной поверхности

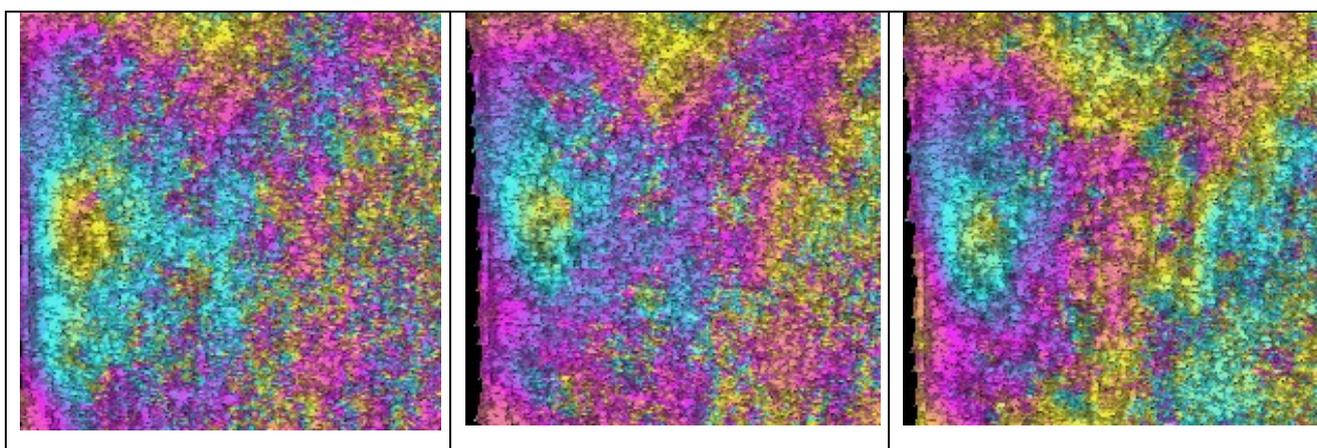


Рисунок 7 – Примеры выявленных признаков смещений земной поверхности

5.4. Анализ развернутых интерферограмм.

5.4.1. Основные результаты анализа. При проведении анализа развернутых интерферограмм должны выявляться "плохо развернутые" интерферограммы, характеризующиеся наличием отделенных от остальной части изображения фрагментов с кратными 2π скачками фазы ("острова"). Пороговое значение когерентности при проведении развертки интерферограмм установлено равным 0,35. Уровень декомпозиции установлен равным единице [1,3]. На рис.8 представлены "классические" примеры, взятые из [3]:

изображения "острова" значительного размера, линейного горизонтального разрыва фазы; а также пример построения "сечения".

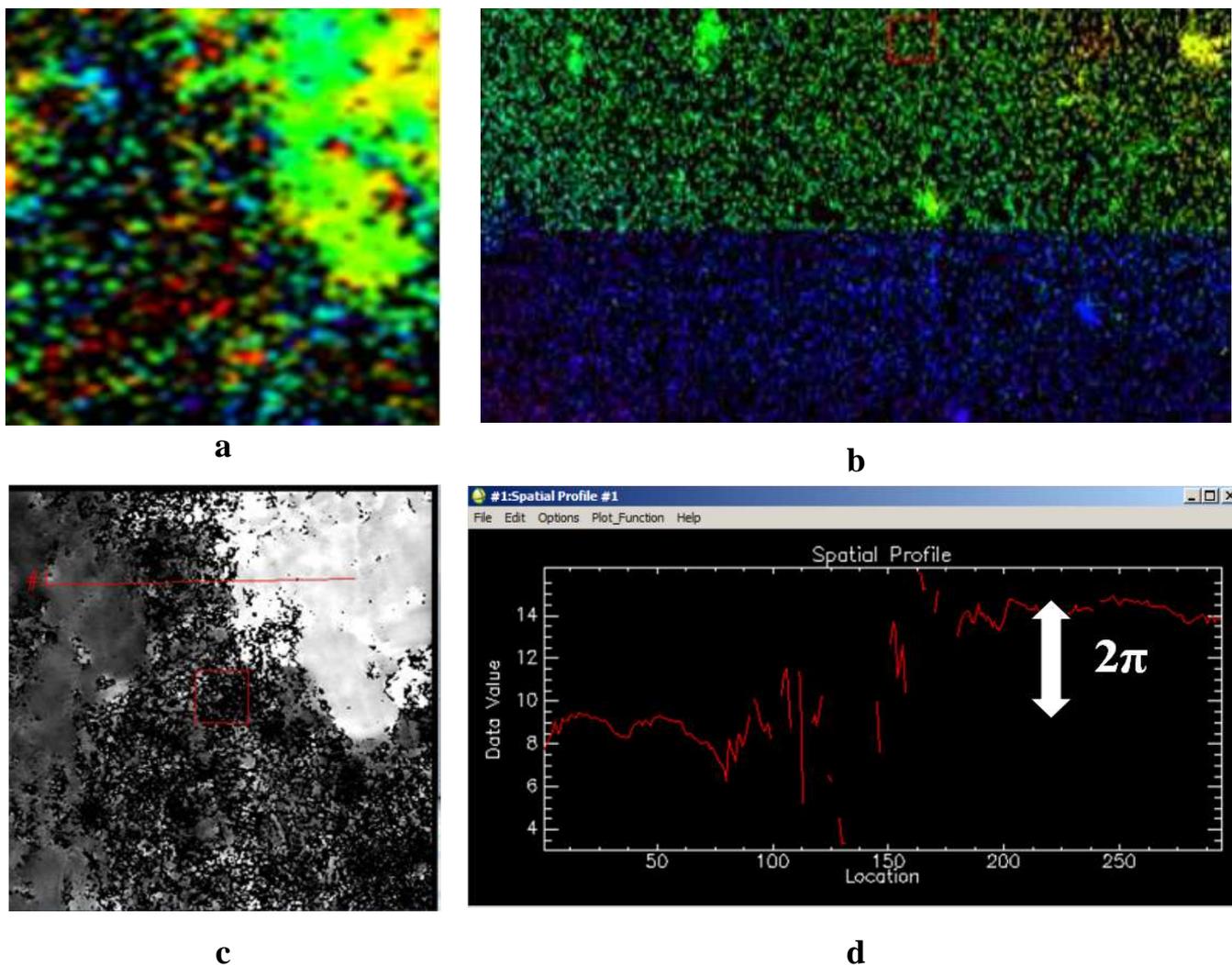


Рисунок 8 – Фрагменты развернутых интерферограмм: а – "остров" значительного размера; б – линейный горизонтальный разрыв фазы; с и d – пример построения "сечения"

6. Коррекция орбитальных ошибок

Коррекция орбитальных ошибок проводилась с использованием опорных точек местности (ОТМ), выбранных на файлах развернутой фазы. При выборе местоположения ОТМ осуществлялся контроль отсутствия интерференционных полос, связанных с ошибками топографии опорной ЦМР и со смещениями земной поверхности. С целью повышения точностных характеристик выходных

продуктов (за счет эффективного усреднения ошибок опорной ЦМР) использовано более 40 ОТМ. Коррекция проводилась методом Residual Phase refinement, алгоритм которого основан на удалении "перекоса" фазы, оцененного на файлах развернутой фазы с использованием ОТМ и который в среднем дает более надежные и устойчивые результаты. Для обеспечения условий более корректной сопоставимости выходных результатов использовался единый набор ОТМ для обеих временных серий изображений, вследствие чего поиск ОТМ осуществлялся на двух репрезентативных интерферограммах (первая по данным PCA ASAR/ENVISAT, вторая – PCA PALSAR/ALOS), прошедших орторектификацию. Далее программное обеспечение автоматически выполнило обратное преобразование координат ОТМ в геометрию наклонной дальности каждой из двух временных серий изображений [1,3].

7. Первая инверсия

Предварительная оценка векторов смещений \vec{p} и остаточной топографии Δh проводилась в рамках линейной модели изменения фазового сигнала смещения во времени (с оценкой только средней скорости смещения \bar{v}), считающейся более надежной в отсутствие достоверной априорной информации относительно характера поведения смещений во времени. После расчета и удаления фазовых компонент, связанных со смещениями \vec{p} и остаточной топографией Δh , проведена вторая развертка фазы свернутых интерферограмм. Уровень декомпозиции увеличен до двух. Выполнен повторный анализ развернутых интерферограмм [1,3].

В целом по результатам проведенного анализа свернутых и развернутых интерферограмм удалены, соответственно, 26 ASAR/ENVISAT-интерферограмм и 5 PALSAR/ALOS-интерферограмм. Основные причины: низкая когерентность из-за слишком большой временной базовой линии и ошибки развертки фазы.

8. Вторая инверсия и орторектификация

Атмосферная коррекция выполнена с использованием процедур низкочастотной пространственной и высокочастотной временной фильтрации атмосферной фазы; линейные размеры квадратного окна низкочастотного пространственного фильтра $L=1200$ м, ширина треугольного фильтра по оси времени $2T_{\max} = 365$ дням [6,7].

Модель изменения фазового сигнала смещений во времени оставлена линейной. Рассчитаны уточненные значения средней скорости смещения \bar{v} и временные серии накопленной деформации $d(t_i, x, r)$ для каждого $i = 1, \dots, N$. Для всех результатов, полученных в рамках этапов первой и второй инверсии, выполнена процедура орторектификации; размер ячейки для обеих временных серий РСА-изображений установлен равным 25 м. Средние скорости смещения \bar{v} и серии накопленной деформации $d(t_i, x, r)$ спроектированы на вертикальное направление [1,3].

8.1. Уточненные значения средней скорости смещения

На рис. 9 отображены рассчитанные цифровые карты средней скорости смещения (ЦКССС). Вверху ЦКССС1 (по данным L-диапазона, РСА PALSAR/ALOS), внизу ЦКССС2 (по данным С-диапазона, РСА ASAR/ENVISAT). При отображении полученных результатов использовалась цветовая палитра Rainbow; границы отображаемого диапазона: -17 мм/год (темно-синий цвет) и $+7$ мм/год (красный цвет).

При проведении сравнительного анализа значений средней скорости смещения по данным РСА ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS была рассчитана разностная цифровая карта средней скорости смещения Δ ЦКССС:

$$\Delta\text{ЦКССС} = \text{ЦКССС1} - \text{ЦКССС2} \quad (5)$$

и, далее, определены значения относительного смещения $\overline{\Delta ЦКССС}$ и среднеквадратического отклонения (СКО), которые оказались равными:

$$\overline{\Delta ЦКССС} = 0,62 \text{ мм/год}; \text{СКО} = 2,8 \text{ мм/год} \quad (6)$$

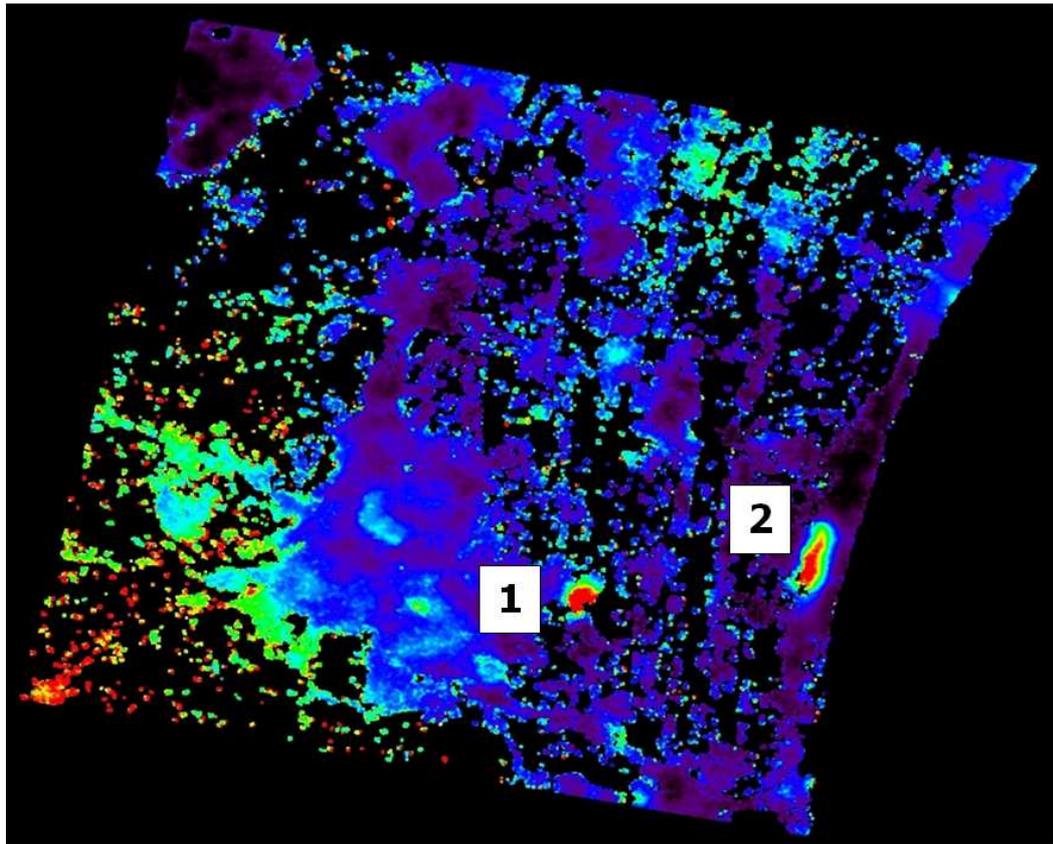
В заключение следует особо подчеркнуть, что ЦКССС1 и ЦКССС2 были построены с использованием данных, полученных в разных частотных диапазонах, причем съемки каждым РСА проводились в разные даты, т.е. при заведомо различающихся атмосферных условиях наблюдения. Это позволяет утверждать, что полученные оценки являются достаточно объективной характеристикой точности самого метода SBAS.

8.2. Возможности использования результатов расчетов на основе распределения хи-квадрат

На следующем изображении демонстрируются возможности использования дополнительного слоя с результатами расчетов на основе распределения хи-квадрат, позволяющего проводить анализ результатов не только в терминах величины средней скорости смещения, но также и в терминах типов движения. На рис. 10а приведено изображение слоя, рассчитанного по данным РСА ASAR/ENVISAT. Поскольку при проведении исследования была выбрана линейная модель изменения фазового сигнала смещения во времени, все точки с сильной нелинейностью имеют на этом слое относительно более высокие значения (и отображаются красным цветом). Пятна красного цвета на отображенном фрагменте четко фиксируют границы двух участков с сильной нелинейностью смещений во времени.

В качестве иллюстрации на рис. 10b представлены графики для временных серий накопленной деформации d (на примере данных РСА ASAR/ENVISAT) для двух точек с близкими значениями средней скорости смещений, но имеющих существенно различающиеся значения результатов расчетов на основе распределения хи-квадрат (временная серия с нелинейностью выделена красным цветом). Приведенные графики полностью подтверждают ожидаемые различия.

a



b

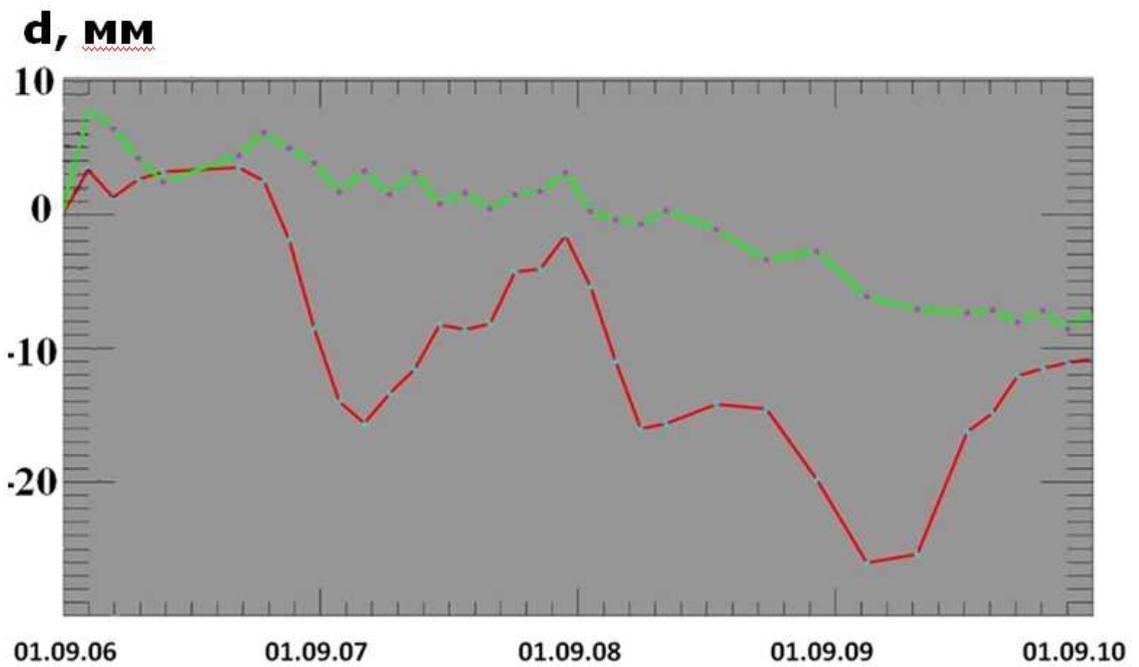


Рисунок 10 – Два участка с сильной нелинейностью (a) и временные серии накопленной деформации для двух точек с резко различающимися типами движений (b)

9. Сопоставление результатов SBAS-обработки спутниковой информации с результатами наземных GPS-измерений

При сопоставлении результатов SBAS-обработки спутниковой информации с результатами наземных GPS-измерений использовались данные единственной доступной GPS-точки, находящейся в пределах области "покрытия" земной поверхности изображениями РСА ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS; территория съемки – префектура Тиба, Япония. Префектура Тиба расположена на восточной части острова Хонсю, к востоку от Токио. Проходящее возле Тибы течение Куроисио делает зиму здесь более мягкой, чем в Токио, с положительными средними температурами. Вследствие этого процессы замерзания-оттаивания почвы зимой, обычно приводящие к нежелательной динамике отражающей поверхности, здесь практически не наблюдаются. Границы области "покрытия" земной поверхности изображениями РСА и положение GPS-точки показаны на рис.11.

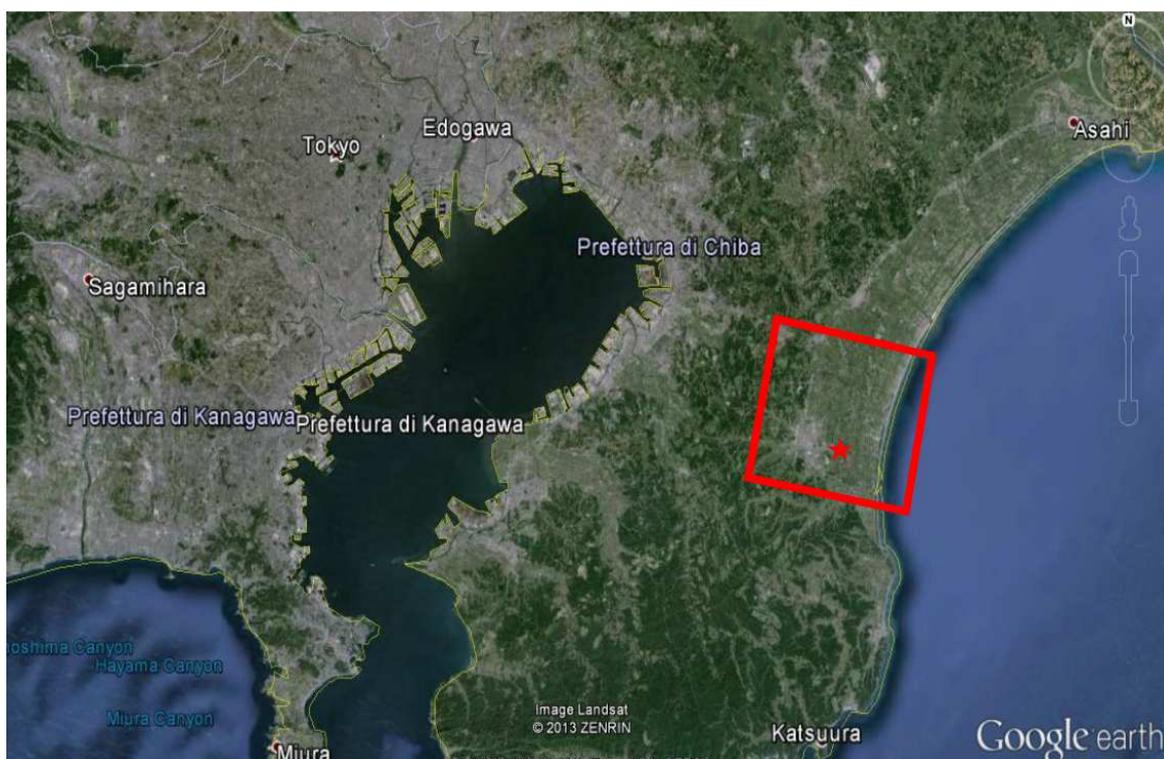


Рисунок 11 – Границы области "покрытия" земной поверхности изображениями РСА и положение GPS-точки

Выполнен импорт результатов наземных GPS-измерений и проведена низкочастотная фильтрация этих данных скользящим временным окном длительностью 50 дней (с целью подавления сильной вариабельности данных). Далее были автоматически сформированы выборки, содержащие GPS-измерения для наборов дат, соответствующих датам съемки каждой из двух временных серий изображений, и выполнен пересчет величин накопленной деформации на направление наклонной дальности.

На рис. 12 показаны временные серии накопленной деформации d (в мм) по данным: а – PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS; б – PCA ASAR/ENVISAT и GPS1 и с – PCA PALSAR/ALOS и GPS2 (GPS1 и GPS2 – временные серии накопленной деформации по данным GPS на несовпадающие даты съемок длинных временных серий изображений PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS, соответственно). Используются следующие цвета: синий – для PCA ASAR/ENVISAT; зеленый – для PCA PALSAR/ALOS; красный – для GPS1 и GPS2.

В таблице 2 приведены результаты количественного сопоставления временных серий накопленной деформации по спутниковым и наземным данным: (1) относительные смещения и (2) СКО между временными сериями накопленной деформации по спутниковым и наземным данным, а также (3) средние скорости смещения по спутниковым и наземным данным и (4) их разности.

Как следует из приведенных данных, относительные смещения между временными сериями накопленной деформации по спутниковым (PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS) и наземным данным (GPS1 и GPS2) равно, соответственно, $-7,5$ и $-6,6$ мм, (строки 1,2), а СКО равно $4,4$ и $4,8$ мм (строки 3,4).

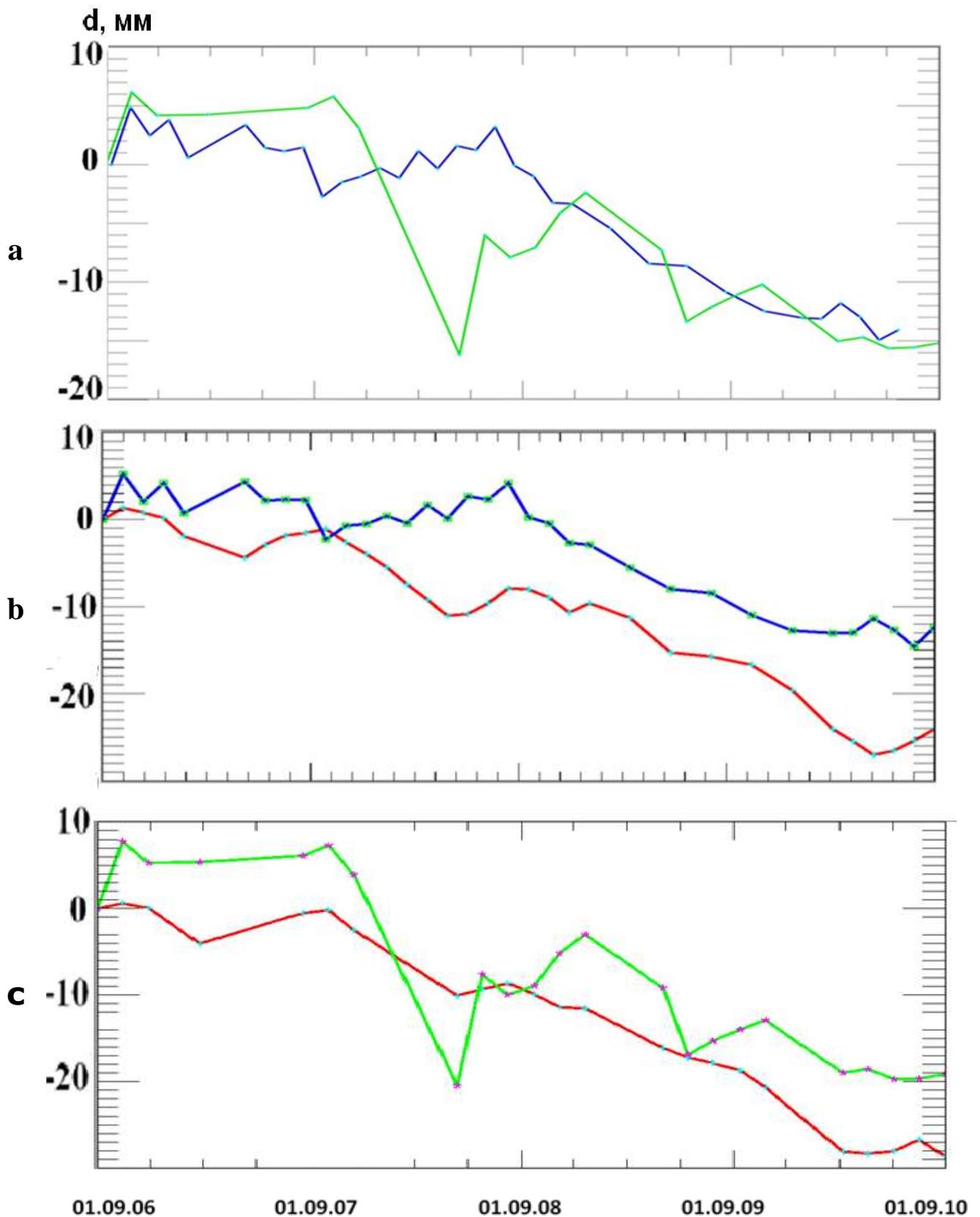


Рисунок 12 – Временные серии накопленной деформации по данным PCA ASAR/ENVISAT, PCA PALSAR/ALOS; GPS1 и GPS2.

Разность между средними скоростями смещений по данным PCA ASAR/ENVISAT (–4,4 мм/год, строка 5) и наземным данным, GPS1, (–7,2 мм/год, строка 6) оказалась равной 2,8 мм/год (строка 7); разность между средними скоростями смещений по данным PCA PALSAR/ALOS (–5,4 мм/год, строка 8) и наземным данным, GPS2, (–7,7 мм/год, строка 9) равна 2,3 мм/год (строка 10). При этом разность между средними скоростями смещений по данным ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS оказалась равной 1,0 мм/год (строка 11). Следует обратить внимание, что приведенные в строках 6 и 9 значения средней скорости смещения по данным GPS1 и GPS2 (–7,2 и –7,7 мм/год) различаются на 0,5 мм/год. Как уже отмечалось выше, несовпадение этих значений скорости объясняется, тем, что при их расчетах использовались разные временные серии GPS-измерений (соответствующие не совпадающим моментам съемки временных серий PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS, соответственно).

Таблица 2 – Результаты количественного сопоставления временных серий накопленной деформации по спутниковым и наземным данным

№ п/п	Рассчитываемые величины	
1	Относительное смещение между ASAR/ENVISAT-серией и GPS1-серией, мм	–7,5
2	Относительное смещение между PALSAR/ALOS-серией и GPS2-серией, мм	–6,6
3	СКО между ASAR/ENVISAT-серией и GPS1-серией, мм	4,4
4	СКО между PALSAR/ALOS-серией и GPS2-серией, мм	4,8
5	Средняя скорость смещения по данным ASAR/ENVISAT, мм/год	–4,4
6	Средняя скорость смещения по данным GPS1, мм/год	–7,2
7	Разность между ASAR/ENVISAT и GPS1, мм/год	2,8
8	Средняя скорость смещения по данным PALSAR/ALOS, мм/год	–5,4
9	Средняя скорость смещения по данным GPS2, мм/год	–7,7
10	Разность между PALSAR/ALOS и GPS2, мм/год	2,3
11	Разность между ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS, мм/год	1,0

9. Выводы

Представлены результаты комплексных экспериментальных исследований метода малых базовых линий, в рамках которого (в отличие от метода

постоянных рассеивателей) реализуется возможность формирования пространственно "плотных" выходных продуктов. Исследования выполнены на примере модуля SBAS программного пакета SARscape и тестового массива, состоящего из двух длинных временных серий изображений PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS с привлечением данных подспутниковых GPS-измерений.

Продемонстрирована фундаментальная роль проводимого в диалоговом режиме визуального анализа формируемых наборов свернутых и развернутых интерферограмм, в рамках которого выявляются различные нежелательные артефакты (характерные признаки атмосферных фазовых искажений, низкий уровень когерентности из-за слишком большой временной и/или пространственной базовой линии, "плохо развернутые" интерферограммы, характеризующиеся наличием фрагментов с кратными 2π скачками фазы), проблемы с данными (наличие параллельных интерференционных полос из-за значительных погрешностей в орбитальных параметрах и "размытость" в направлении наклонной дальности вследствие недостаточно корректного совмещения для этого направления). Дополнительно выполняется предварительный поиск зон деформации земной поверхности. В общей сложности по результатам проведенного анализа удалено 26 ASAR/ENVISAT-интерферограмм и 5 PALSAR/ALOS-интерферограмм.

Коррекция орбитальных ошибок проведена методом Residual Phase refinement с использованием более 40 опорных точек местности (ОТМ), выбранных вне зоны деформации земной поверхности. Для обеспечения условий более корректной сопоставимости выходных результатов использовался единый набор ОТМ для обеих временных серий изображений; поиск ОТМ осуществлялся на орторектифицированных интерферограммах (с последующим обратным преобразованием координат ОТМ в геометрию наклонной дальности).

В рамках сравнительного анализа рассчитанных по данным PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS значений средней скорости смещения

показано, что усредненные по площади изображений значения разности средней скорости смещения оказались равными 0,62 мм/год, а стандартное отклонение 2,8 мм/год. Необходимо отметить, что при проведении сравнительного анализа использовались данные разных частотных диапазонов (С и L) с разными датами съемки (и, следовательно, полученные при различающихся атмосферных условиях наблюдения). Это позволяет утверждать, что полученные оценки являются достаточно объективной характеристикой точности самого метода SBAS.

Показано также, что использование результатов расчетов на основе распределения хи-квадрат позволяет проводить анализ не только в терминах величин средней скорости смещения, но также и в терминах типов движения.

Выполнено сопоставление результатов SBAS-обработки спутниковых данных с результатами наземных GPS-измерений (для единственной доступной GPS-точки, находящейся в пределах области "покрытия" земной поверхности изображениями PCA). Установлено, что относительные смещения между временными сериями накопленной деформации по спутниковым (ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS) и наземным данным равно, соответственно, -7,5 и -6,6 мм, а СКО равно 4,4 и 4,8 мм.

Показано, что разность между средними скоростями смещений по спутниковым (PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS) и наземным данным (GPS1 и GPS2) равна соответственно, 2,8 и 2,3 мм/год; разность между средними скоростями смещений по данным ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS оказалась равной 1,0 мм/год. Зафиксировано различие в 0,5 мм/год между значениями средней скорости смещения, рассчитанных по данным GPS1 и GPS2 (временным сериям GPS-измерений, соответствующим не совпадающим моментам съемки временных серий PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS, соответственно).

Резюмируя, необходимо отметить исключительно высокий программно-алгоритмический уровень реализации современных методов интерферометрии. Как следствие – жесткие требования к профессиональной подготовке

оператора, который на основе анализа характеристик входного массива и выявленных артефактов должен реализовать корректный выбор как алгоритмов обработки, так и значений их ключевых параметров. Современные программные комплексы включают большой объем интерактивных процедур визуально-инструментального анализа промежуточных и конечных результатов обработки, корректировки, в случае необходимости, сделанного выбора алгоритмов и значений их параметров, повторного запуска процесса обработки, а также удаления интерферограмм с высоким уровнем шумов и наличием неустраняемых артефактов. Фундаментальную роль должны играть четкие методические рекомендации, разработка которых способна обеспечить реальные возможности оперативного решения проблем, возникающих при проведении обработки в технологическом режиме.

Литература

1. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Денисов П.В., Гусев М.А. Исследование возможностей метода малых базовых линий на примере модуля SBAS программного пакета SARscape и данных PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS. Часть 1. Ключевые моменты метода // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], в печати.
2. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., and Sansosti E., 2002. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40, pp. 2375-2383.
3. SBAS workflow, 2013 // SBAS tutorial. Ver. 2.0. ITT Visual Information Solutions. Pearl East Circle. Boulder CO. p. 92.
4. A Modification to the Goldstein Radar Interferogram Filter / Baran I., Stewart M.P., Kampes B.M., Perski Z., Lilly P. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. –2003. – Vol. 41. – No 9. – P. 1-9.
5. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Денисов П.В., Гусев М.А. Анализ предельных возможностей оценки деформации земной поверхности в зоне

землетрясения в Японии 11.03.2011 г. по данным PCA ASAR/ENVISAT с использованием программного пакета SARscape // Материалы V Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». – Муром, 26-28 июня 2012 г. – (CD-ROM). – С. 258-263.

6. Феокистов 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>

7. Феокистов 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>