

УДК 528.71

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДЗЗ ОТ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ

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 5 декабря 2014 г.

Аннотация. В статье приведены результаты исследования влияния параметров модуля PS пакета SARscape на результаты обработки тестового набора радиолокационных данных ASAR/ENVISAT методом постоянных рассеивателей.

Ключевые слова: метод постоянных рассеивателей, PCA, атмосферный фазовый экран, ЦММ, ASAR, ENVISAT.

Abstract. Study of influence of SARscape PS module processing parameters on the efficiency of interferometric data processing procedure is made. The results of ASAR/ENVISAT data processing in the study are presented.

Key words: persistent scatterers technique, PS, SAR, ASAR, ENVISAT, atmospheric phase screen, APS, DEM.

1. Введение

В работе представлены результаты экспериментальных исследований возможностей метода постоянных рассеивателей (PS) [1], полученные при обработке данных радиолокатора с синтезированной апертурой (PCA) ASAR/ENVISAT с помощью модуля PS программного пакета SARscape (версия 5.0).

Ввиду отсутствия каких-либо результатов подспутниковых измерений основной акцент сделан на анализе относительных точностных характеристик выходных продуктов модуля PS, включая средние значения и СКО рассчитанных скоростей смещений и остаточных высот.

2. Входные данные

Использована временная серия из 25 фрагментов изображений (размером 16×17 км²) PCA ASAR/ENVISAT, полученных в период с 25.10.2002 по 27.01.2006 по одному из районов вблизи города Лас Вегас, США. Данные представляют собой тестовый массив, поставляемый вместе с пакетом SARscape. Формат данных – Single Look Complex (SLC), режим съемки IS2 (угол падения в центре кадра 23°, поляризация VV). В качестве опорной цифровой модели местности (ЦММ) в обработке использована модель SRTM V4.

В таблице 1 приведена общая информация о наборе использованных данных: порядковые номера опорного и парного радарных изображений, составляющих интерферометрические пары, даты съемки, значения нормальных компонент базовых линий и временных интервалов между съемками опорного и парного изображений каждой пары в днях. Опорное изображение (порядковый номер 21, дата съемки – 27 мая 2005 г.) выбрано модулем PS в автоматическом режиме по критерию минимизации пространственных и временных базовых линий. Последняя колонка содержит краткие сведения о погодных условиях в течение дня съемки: наличие осадков и средняя температура за сутки. Следует отметить, что все изображения тестовой территории с пустынным субтропическим климатом получены при положительной среднесуточной температуре и отсутствии, в основном, каких-либо значительных осадков.

На рис. 1 представлено двумерное распределение значений нормальных компонент базовых линий B и временных интервалов T между съемками

опорного и парных изображений; опорное изображение номер 21 имеет нулевые координаты.

Таблица 1 – Характеристики тестового набора данных

№ п/п	Даты съемки	Нормальные компоненты базовых линий, м	Временные интервалы между съемками опорного и парного изображений, дни	Среднесуточная температура, осадки
1	25.10.2002	268,64	945	+17
2	29.11.2002	32,8015	910	+14
3	03.01.2003	-68,679	875	+11
4	07.02.2003	17,4764	840	+5
5	18.04.2003	1182,98	770	+12
6	27.06.2003	-143,459	700	+30
7	01.08.2003	-277,85	665	+26
8	23.01.2004	-115,696	490	+7
9	27.02.2004	-608,075	455	+10
10	02.04.2004	887,002	420	+12, дождь
11	07.05.2004	-898,869	385	+27
12	11.06.2004	300,68	350	+28
13	16.07.2004	129,82	315	+32, дождь, гроза
14	20.08.2004	-332,07	280	+31
15	24.09.2004	-763,912	245	+26
16	29.10.2004	404,058	210	+12
17	03.12.2004	269,491	175	+7
18	11.02.2005	-327,003	105	+19, дождь
19	18.03.2005	-518,212	70	+15
20	22.04.2005	492,485	35	+20
21	27.05.2005	0	0	+32
22	05.08.2005	-146,033	-70	+32
23	18.11.2005	359,558	-175	+14
24	23.12.2005	243,658	-210	+14
25	27.01.2006	-947,147	-245	+12

Экспериментальные исследования проведены в пределах границ рекомендованного [2] фрагмента тестового изображения (квадрат со стороной на местности 8 км); файловые координаты (в пикселях) для этого фрагмента заданы координатами верхнего левого (1000, 200) и правого нижнего (3000, 600) углов.

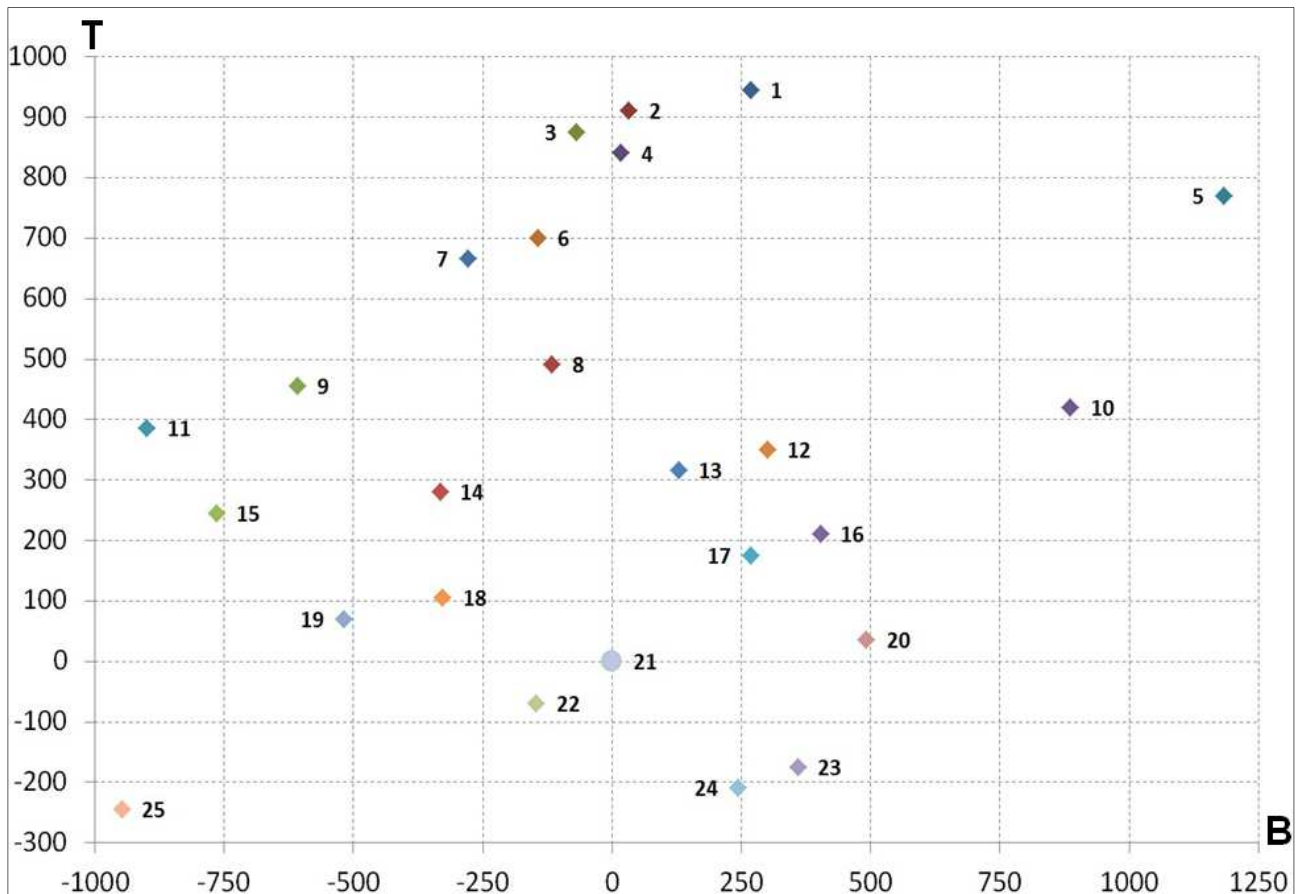


Рисунок 1 – Двумерное распределение значений нормальных компонент базовых линий В и временных интервалов Т между опорной и парной съемками

Ниже приведены значения ряда параметров проведения интерферометрической обработки, заданных по умолчанию в модуле PS [1-2]:

- Параметры дискретизации на этапе формирования интерферограмм (отрицательное значение – избыточная дискретизация):

$$\text{для направления по наклонной дальности Range Looks} = -4 \quad (1)$$

$$\text{для направления по азимуту Azimuth Looks} = 1 \quad (2)$$

- Параметры усреднения интерферограмм, используемые на этапе формирования выходных продуктов:

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

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

- Размеры атмосферных окон, м:

$$D = 5000 \quad (5)$$

- Перекрытие атмосферных окон, %:

$$\text{для направления по наклонной дальности } Range\ Overlap = 20 \quad (6)$$

$$\text{для направления по азимуту } Azimuth\ Overlap = 10 \quad (7)$$

- Линейные размеры низкочастотного фильтра, м:

$$L = 1200 \quad (8)$$

- Значение параметра $2T_{max}$ высокочастотного фильтра, дни:

$$2T_{max} = 365 \quad (9)$$

- Пороговое значение когерентности γ по ансамблю изображений (используется при поиске расширенного набора PS и априорной оценке точности расчетов скорости смещения и остаточной высоты):

$$\gamma = 0,8 \quad (10)$$

- Плотность PS (используется при проведении априорной оценки точности расчетов скорости смещения и остаточной высоты), PS/км²:

$$PS\ Density = 200 \quad (11)$$

- Границы отображаемых на схемах распределения PS значений скорости смещений:

$$KML\ scaling\ range = \pm 10\ \text{мм/год} \quad (12)$$

3. Предварительный анализ усредненного изображения тестового фрагмента

На рис. 2 представлено усредненное изображение тестового фрагмента, полученное в результате последовательного выполнения двух процедур:

расчета средних значений амплитуды – попиксельного усреднения по набору из 25 изображений и орторектификации (значения высоты – из опорной ЦММ).

На рис. 3 приведен один из вариантов схемы распределения PS (набор из 25 изображений, все параметры по умолчанию). Ввиду высокой плотности PS ($215 \text{ PS}/\text{км}^2$) изображения отдельных PS (зеленые крестики) сливаются.

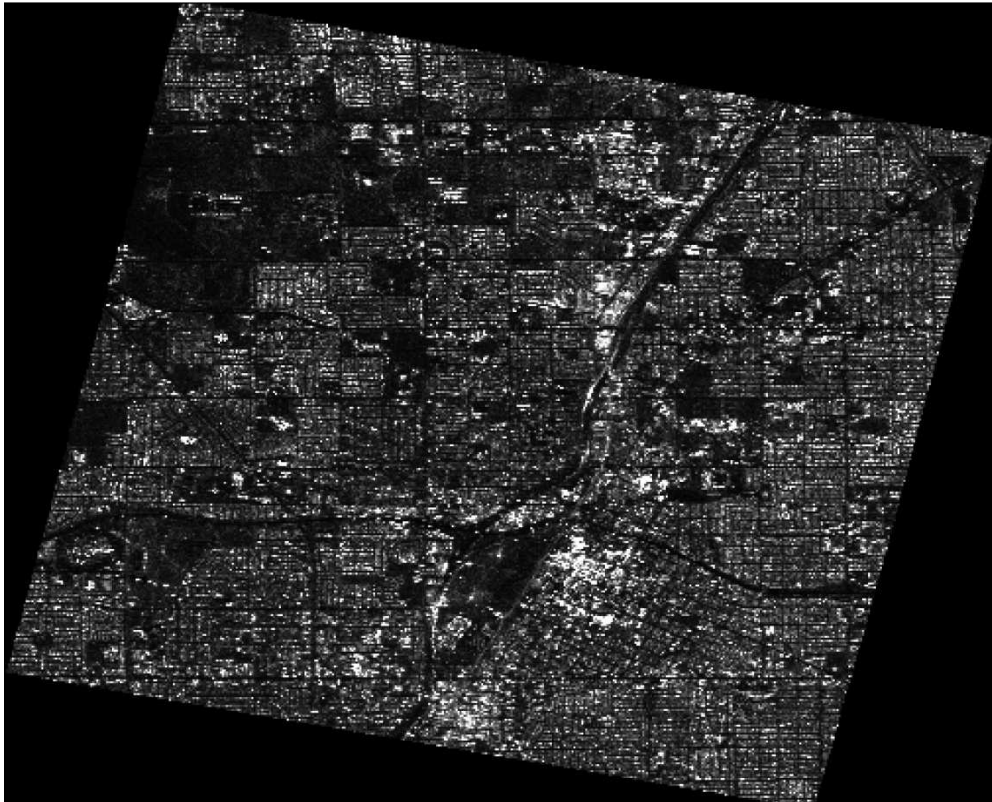


Рисунок 2 – Усредненное изображение тестового фрагмента

На рис. 4 представлены увеличенные фрагменты усредненного изображения и схемы распределения PS; границы фрагментов совпадают и выделены на рис. 3 красным квадратом. Спекл-шум на усредненном изображении подавлен в результате поэлементного усреднения. Относительно яркие светлые точки соответствуют объектам типа “квазиуголковых” отражателей, которые в большом количестве наблюдаются на городских территориях. В местах их скопления локализована основная масса PS (области 1 и 2). PS обнаруживаются и в областях с относительно низкими значениями амплитуды (область 3), поскольку на заключительном этапе обработки в

качестве критерия отбора PS используется только информация о фазе сигнала PCA [1].

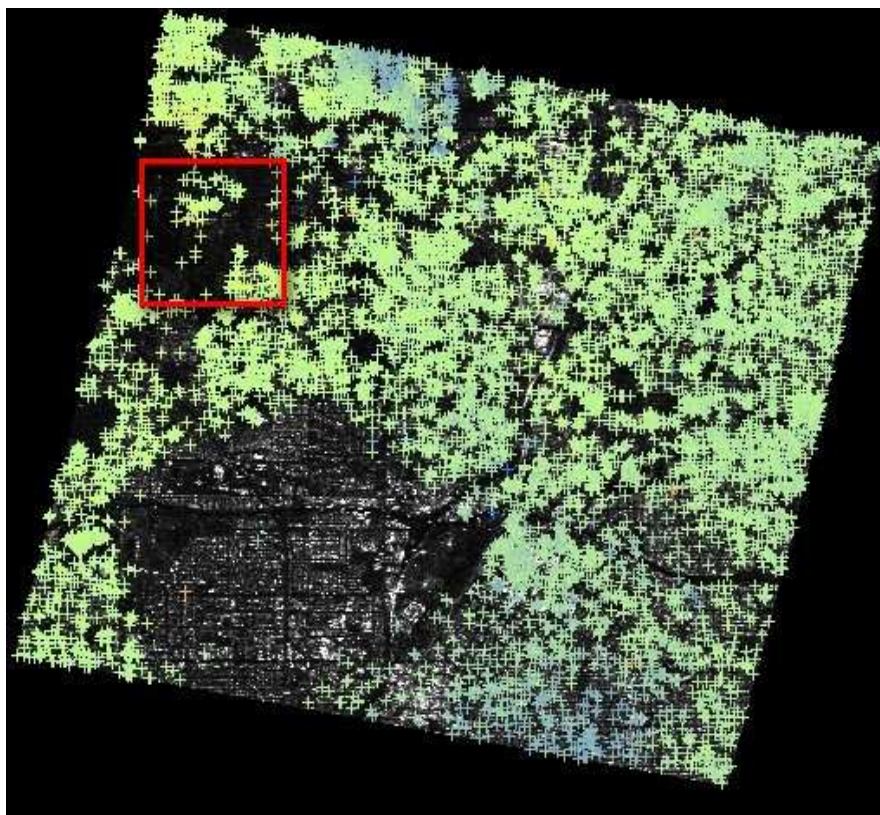


Рисунок 3 – Схема распределения PS

4. Зависимости общих характеристик вычислительного процесса от количества используемых изображений

Метод PS основан на совместной обработке временных серий PCA-изображений территории интереса, полученных в интерферометрическом режиме съемки [3-4]. Требования к минимальному количеству изображений, позволяющему проводить интерферометрическую обработку с целью получения результатов высокой точности, достаточно противоречивы. Например, в [3,4] для обработки по методу PS использованы наборы из 41 и 34 изображений PCA ASAR/ENVISAT, соответственно. В [4] отмечено, что число изображений должно быть больше 30. С другой стороны, согласно [2] минимально требуемое количество изображений находится в диапазоне от 15 до 20. Однако там же содержится противоречащее этому утверждение –

применение метода PS дает приемлемые по точности результаты, если в обработке использованы 20 или более изображений.

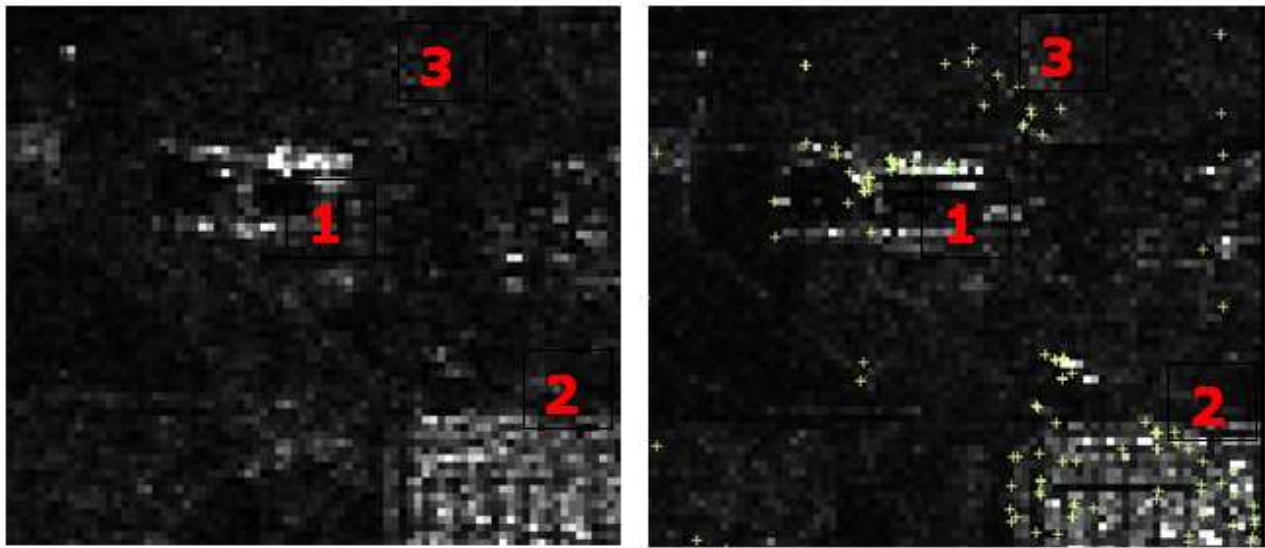


Рисунок 4 – Увеличенные фрагменты усредненного изображения (слева) и распределения PS (справа)

Время получения временной серии изображений, достаточной для проведения обработки методом PS, в повторяющейся геометрии съемки может быть весьма значительно – для получения 30 изображений PCA ASAR/ENVISAT с повторяющихся орбит (период повторения – 35 суток) требуется 1015 дней, т.е. почти три года. С целью проверки критичности использования наборов из большого количества изображений проведен анализ характеристик выходных продуктов обработки методом PS в функции от количества использовавшихся изображений. Выбор максимального количества одновременно используемых изображений ограничен – в тестовом массиве имеется всего 25 изображений. При проведении исследования использована рекомендация из [2], минимальное количество изображений принято равным 15.

В настоящем исследовании количество использованных при обработке изображений последовательно сокращалось с 25 до 15, т.е. на каждом последующем этапе обработки дополнительно исключалось одно изображение,

избегая формирования чрезмерных пропусков в двумерном распределении значений нормальных компонент базовых линий и временных интервалов между съемками опорного и парных изображений.

В таблице 2 для каждого варианта набора данных представлена следующая информация: количество используемых изображений; порядковые номера исключенных изображений; время обработки; общее количество обнаруженных PS; средняя плотность PS.

Таблица 2 – Общие характеристики вычислительного процесса

Количество изображений К	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15
Номер исключенного изображения	–	2	3	17	12	23	18	6	11	22	20
Время обработки, час:мин	1:32	1:24	1:24	1:15	1:10	1:09	1:06	1:03	1:02	0:59	0:59
Количество PS, тыс.	13,8	15,5	15,9	13,5	32,0	13,3	16,8	21,7	27,4	28,1	38,8
Плотность PS/км ²	215	242	248	211	500	208	263	339	428	438	606

Замечание. На всех этапах обработки в качестве опорного использовано изображение с порядковым номером 21. Использование одного и того же опорного изображения необходимо для минимизации относительных сдвигов узлов "нерегулярной сетки" PS, рассчитанных при разных наборах изображений.

4.1. Время выполнения программы

На рис. 5 представлена графическая зависимость времени обработки T_K от количества используемых изображений К. Как следует из представленных данных, при уменьшении К с 25 до 15 время выполнения программы T_K сокращается с 1 часа 32 минут до 59 минут (обработка проведена на рабочей станции следующей конфигурации: материнская плата Gigabyte GA-Z68X-UD3-

В3 (чипсет Intel Z68); процессор Intel Core I7-2600 (8 ядер); оперативная память 16 Гб DDR3; Raid-массив (Raid 0) на основе Seagate Constellation ES).

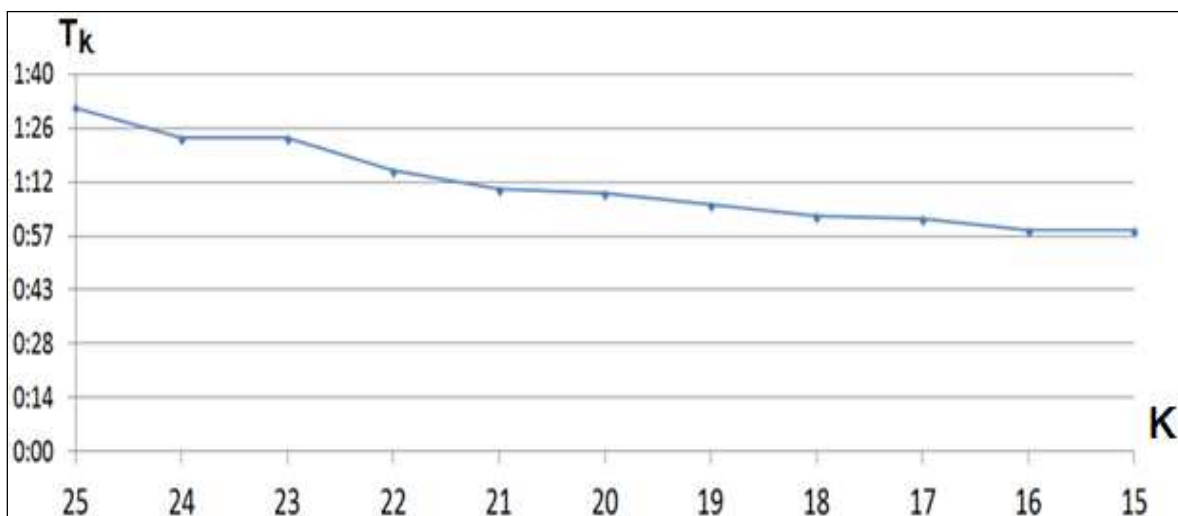


Рисунок 5 – Зависимость времени выполнения программы T_k , час:мин, от количества используемых изображений K

На рис. 6 эти же результаты представлены в относительных единицах; по оси абсцисс отложены значения $K/25$, по оси ординат T_k/T_{25} , где T_{25} – время обработки при максимальном количестве изображений, $K=25$. В этих координатах зависимость оказалась практически линейной с тангенсом угла наклона, близким к 45° .

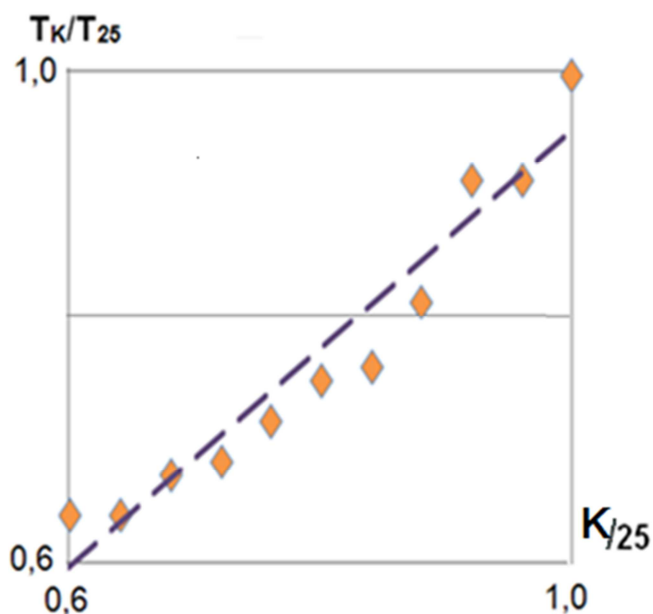


Рис. 6 – Зависимость времени обработки от количества используемых изображений в относительных единицах

4.2. Количество обнаруженных постоянных рассеивателей

Результаты модельных расчетов значений когерентности указывают на возрастание получаемых оценок значений когерентности в случае уменьшения объема выборки, используемой при проведении расчетов [5]. На основании этого в [2] делается вывод о том, что при уменьшении количества изображений в наборе оценки значений когерентности PS по ансамблю изображений должны становиться все более завышенными, вследствие чего должно происходить увеличение количества постоянных рассеивателей (N_{PS}), обнаруженных на изображениях.

Полученная зависимость N_{PS} от K представлена на рис. 7. График можно разделить на две части: относительной стабильности, (выброс при $K=21$ обсуждается ниже), и достаточно быстрого роста,

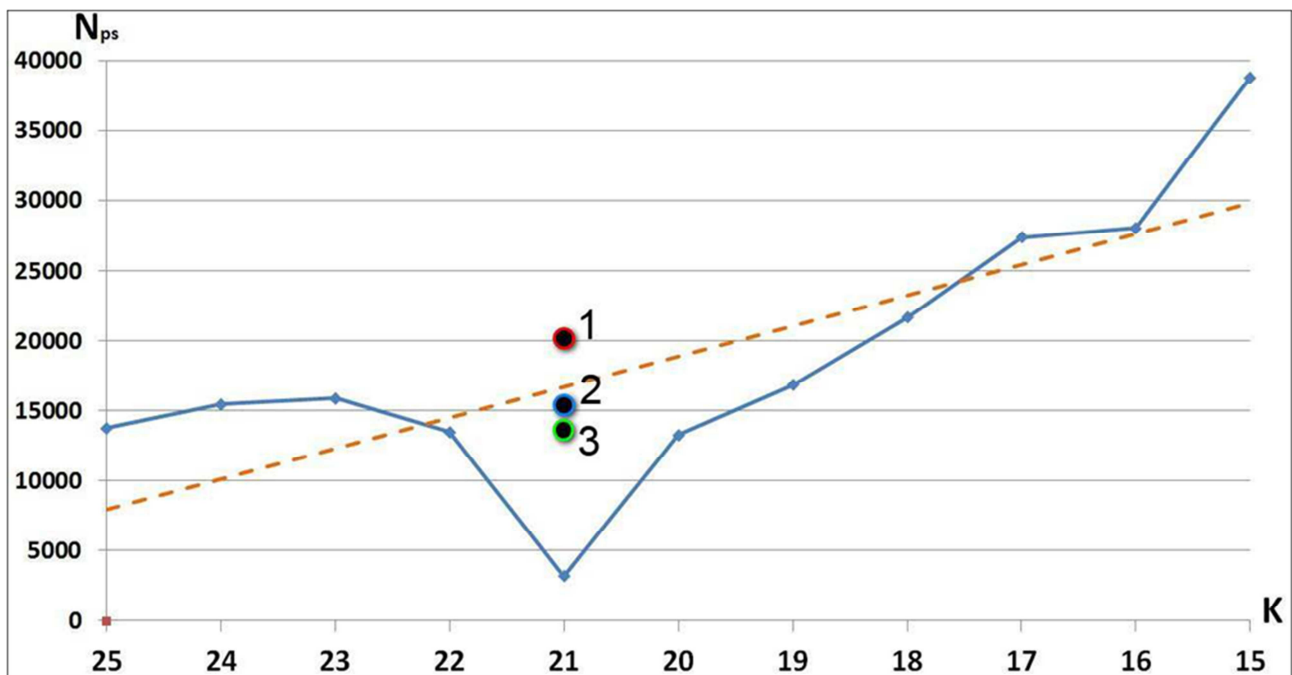


Рисунок 7 – Зависимость количества обнаруженных PS от количества используемых изображений K

Аппроксимирующая линейная зависимость (для графика в целом, пунктирная линия) при числе изображений K , равном 25 и 15, имеет значения,

равные примерно 8000 и 30000, соответственно, т.е. в целом N_{PS} увеличивается почти в 4 раза.

Проведено сопоставление с результатами модельных расчетов [5]. На рис. 8 приведены три графика $E(d)$, описывающие модельные зависимости значений когерентности по выборке объемом d от истинных значений когерентности D (при $d = \infty$). Расчеты выполнены при объемах выборки d равных 4, 10 и 20 элементам. При значениях истинной когерентности D ниже 0,4 уменьшение объема выборки d на 10 элементов (с 20 до 10) действительно приводит к заметному возрастанию рассчитываемых значений когерентности. Однако, в области высоких значений когерентности (пороговое значение когерентности при поиске расширенного набора PS равно 0,8) эти эффекты пренебрежимо малы. Следовательно, результаты модельных расчетов не объясняют аномально сильное увеличение N_{PS} при изменении K (рис. 7).

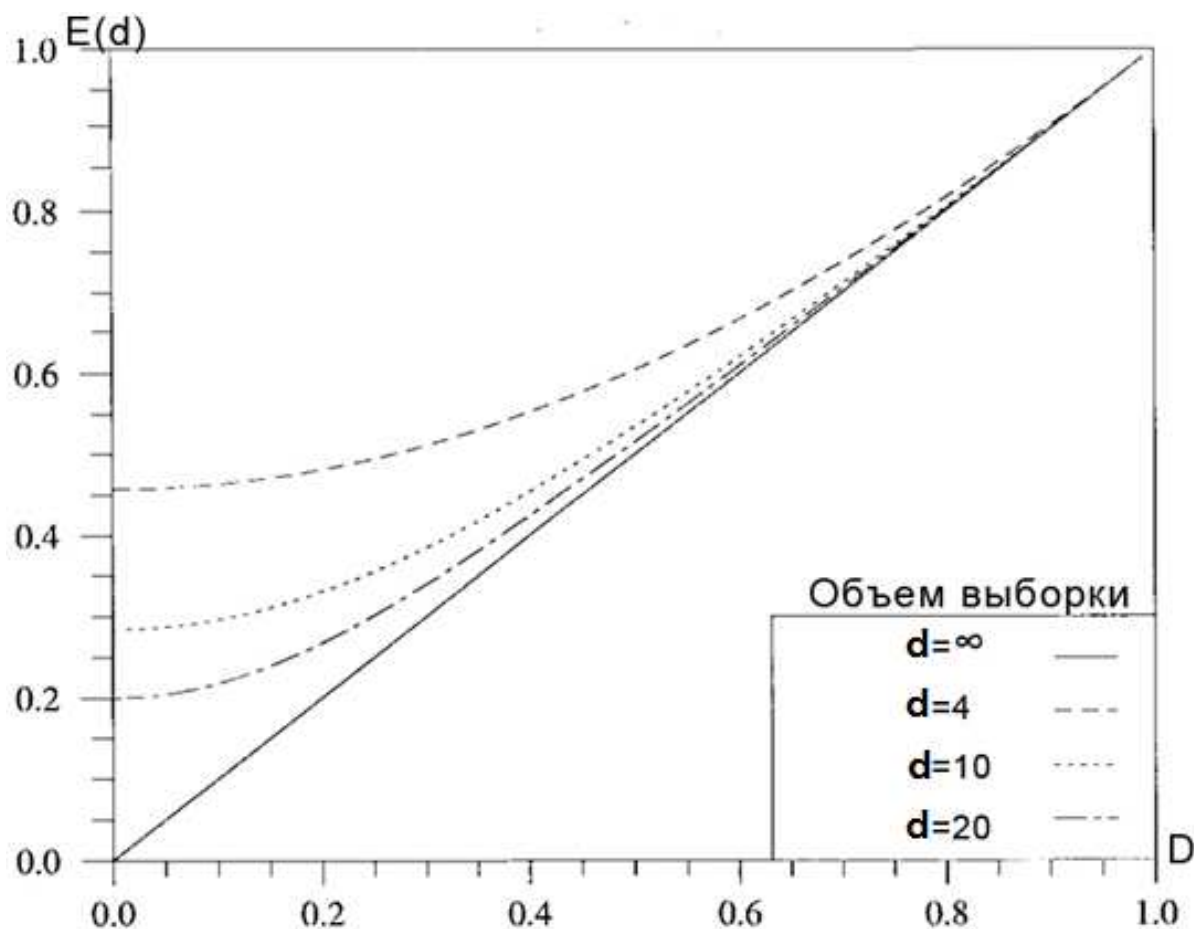


Рисунок 8 – Зависимости рассчитанных значений когерентности $E(d)$ от истинных значений когерентности D

Дополнительно выполнены еще три варианта расчета N_{PS} при $K=21$. В первых двух случаях (точки 1 и 2 на графике – рис. 7) исключенное на этом этапе изображение 12 было заменено на изображения 13 и 16, находящиеся рядом на двумерном распределении, в третьем (точка 3 на графике – рис. 7) – на изображение 15, находящееся на значительном расстоянии (см. рис. 1). В таблице 3 приведены порядковые номера исключенных изображений, количество обнаруженных PS, время обработки. Количество PS, обнаруженных во втором и третьем случаях (точки 2 и 3), достаточно близки к значениям в соседних точках графика (при $K=22$ и $K=20$). Однако в первом случае (замена изображения 12 на изображение 13) снова возникает достаточно заметный выброс, причем с противоположным знаком. Изменение знака выброса для точки 1, возможно, связано с осадками, имевшими место 16.07.2004 (см. таблицу 1). Этот вопрос нуждается в дополнительном более детальном исследовании.

Необходимо отметить, что время обработки T_{21} (см. таблицу 3) практически не зависит от N_{PS} , тогда как в [2] утверждается, между этими характеристиками должна быть линейная связь.

Таблица 3 – Зависимость времени обработки и количества обнаруженных PS от номера исключенного изображения

Исключенное изображение	Количество PS, N_{PS} тысяч	Время обработки T_{21} , час:мин	Номера точек на рис. 7
12	3,2	1:10	–
13	20,3	1:17	1
16	15,7	1:15	2
15	13,5	1:13	3

5. Оценка зависимости времени выполнения программы от степени однородности двумерного распределения параметров съемки

Утверждается [3,4], что для обеспечения достаточно быстрой сходимости алгоритма необходима однородность двумерного распределения параметров съемки в координатах нормальных компонент базовой линии и интервалов

времени между съемками опорного и парных изображений. Поскольку это условие не всегда может быть выполнено по объективным причинам, проведена количественная оценка реального влияния этого фактора с использованием следующих трех наборов из 15 изображений:

1. набора, использовавшегося при исследовании зависимости общих характеристик вычислительного процесса от количества изображений (таблица 2, $K=15$), для данного набора двумерное распределение параметров съемки наиболее однородно (рис. 9а);
2. набора, в котором за счет компактного расположения 10 исключенных изображений сформирован значительный пропуск в распределении съемок по времени в 595 дней (рис. 9б);
3. набора, в котором одновременно сформированы значительные пропуски в распределении съемок по пространству (899 м) и времени (350 дней), рис. 9с.

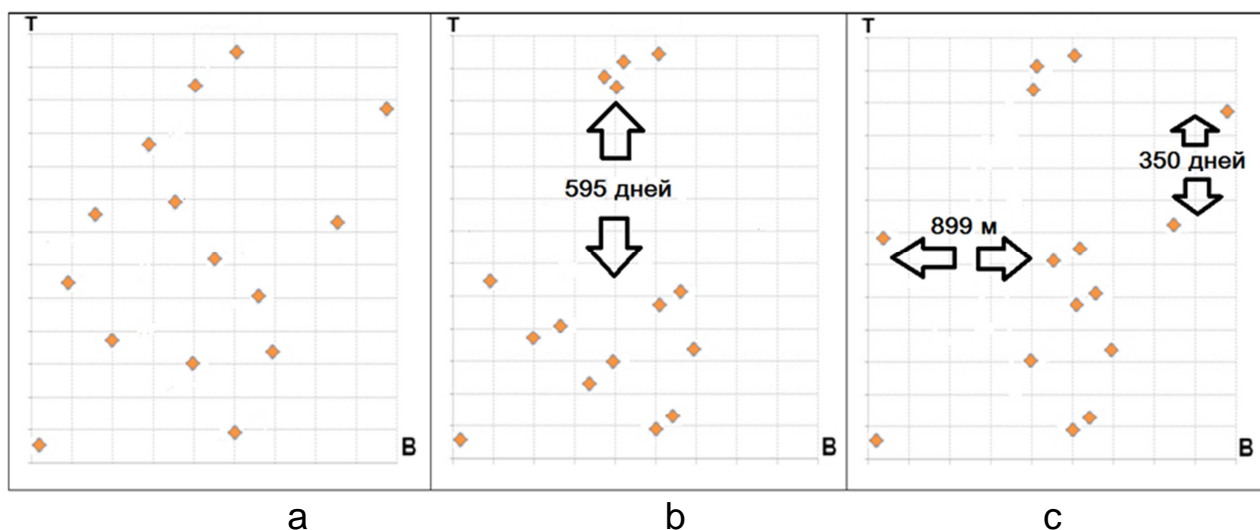


Рисунок 9 – Двумерное распределение значений нормальных компонент В и временных интервалов Т для трех наборов из 15 изображений

Величина времени обработки и количество обнаруженных PS для каждого из этих трех наборов изображений представлены в таблице 4. Нарушения временной и пространственной однородности в двумерном распределении параметров съемки не сказались в значительной степени на времени обработки

(увеличение всего на 5 и 22%), однако привели к относительно резкому увеличению количества обнаруженных PS (на 53 и 99%, соответственно).

Таблица 4 – Время обработки и количество обнаруженных PS

№ набора	Набор 1	Набор 2	Набор 3
Время обработки, час:мин	0:59	1:02	1:12
Количество PS, тыс.	38,8	59,2	77,2

6. Априорные и апостериорные оценки точности расчетов скорости смещений и остаточных высот PS

Модуль PS позволяет получить оценки точности расчетов значений скорости смещения и остаточных высот PS как до выполнения расчетов (априорные оценки), так и после их завершения (апостериорные оценки). Алгоритм расчета априорных оценок основан на использовании значений нормальных компонент базовой линии B и временных интервалов T между съемками опорного и парных изображений, а также значений по умолчанию для когерентности (10) и плотности PS (11). Получаемые оценки относятся ко всему ансамблю обнаруженных PS в целом [1]. Апостериорные оценки формируются усреднением оценок, рассчитанных программой для каждого обнаруженного PS и приведенных в выходных файлах; работает тот же алгоритм, но используются фактические значения когерентности и плотности PS.

На рис. 10 представлена зависимость, описывающая совокупность априорных оценок для каждого из 11 наборов изображений ($K=15, \dots, 25$), использованных при проведении обработки. При увеличении K имеет место монотонное повышение точностных характеристик – значения априорных оценок для среднеквадратичных отклонений (СКО) значений скорости смещения уменьшаются примерно на 36% (с 1,25 до 0,8 мм/год).

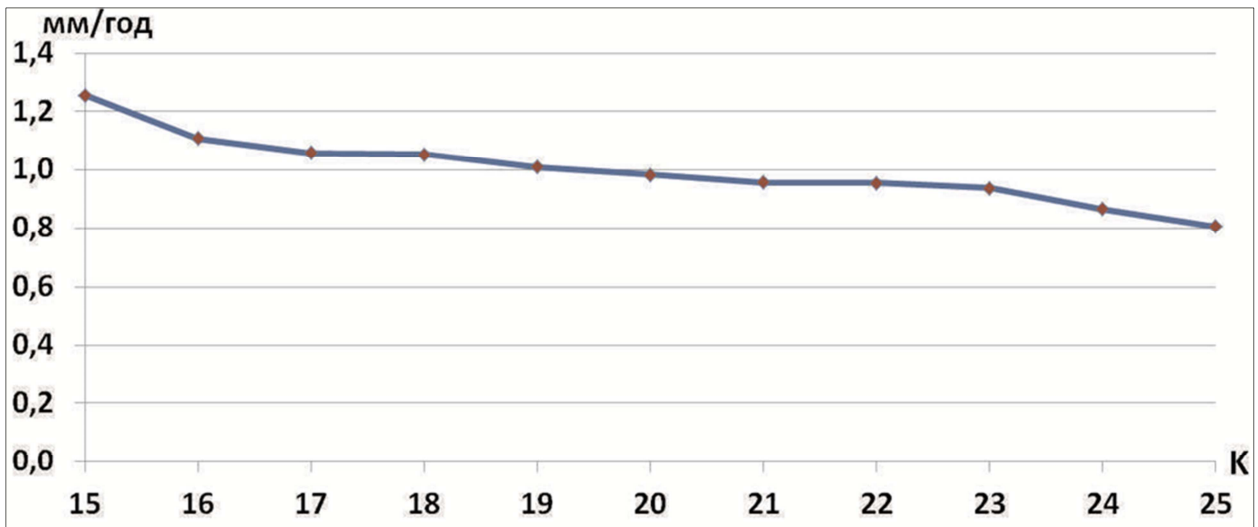


Рисунок 10 – Априорные оценки СКО для значений скорости смещения PS

На рис. 11 представлена зависимость априорных оценок точности расчетов остаточных высот PS от количества изображений, использованных при обработке. При увеличении K от 15 до 25 имеет место падение СКО значений остаточных высот PS примерно на 20% (с 0,5 до 0,4 м).

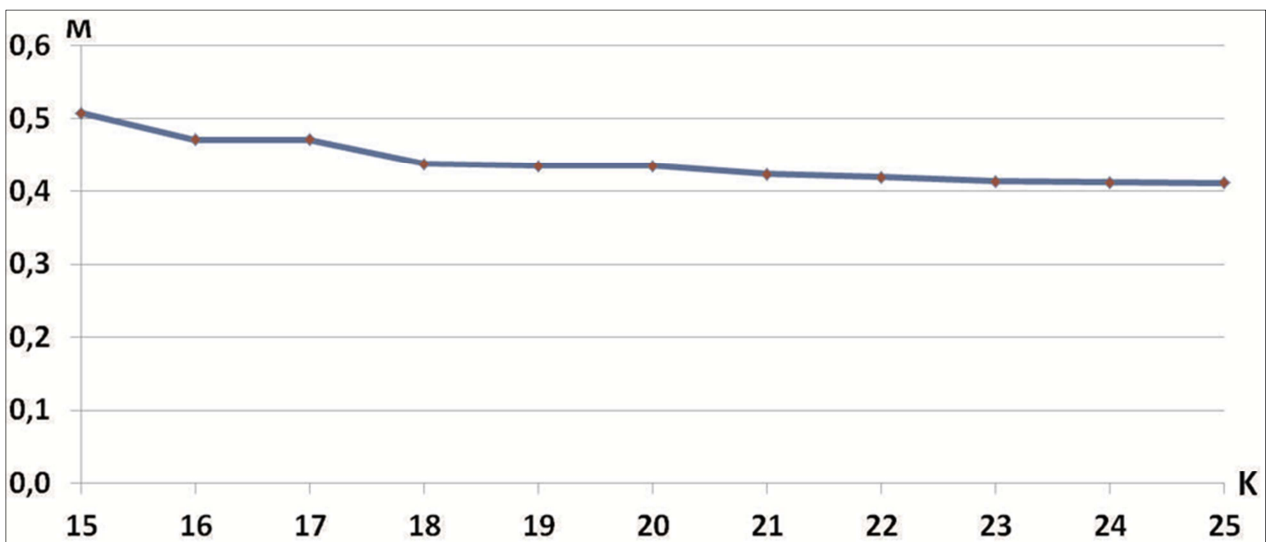


Рисунок 11 – Априорные оценки СКО для значений остаточных высот

Апостериорные оценки точности не получены, поскольку в процессе экспериментальных исследований установлено, что получаемые модулем PS результаты расчетов некорректны. О выявленных программных ошибках

авторы сообщили разработчикам пакета SARscape.

7. Характеристики атмосферных фазовых экранов

На рис. 12 в качестве примера представлено изображение APS_7 (для интерферограммы $k=7$ набора из 25 изображений) после выполнения процедур низкочастотной пространственной и высокочастотной временной фильтрации [1].

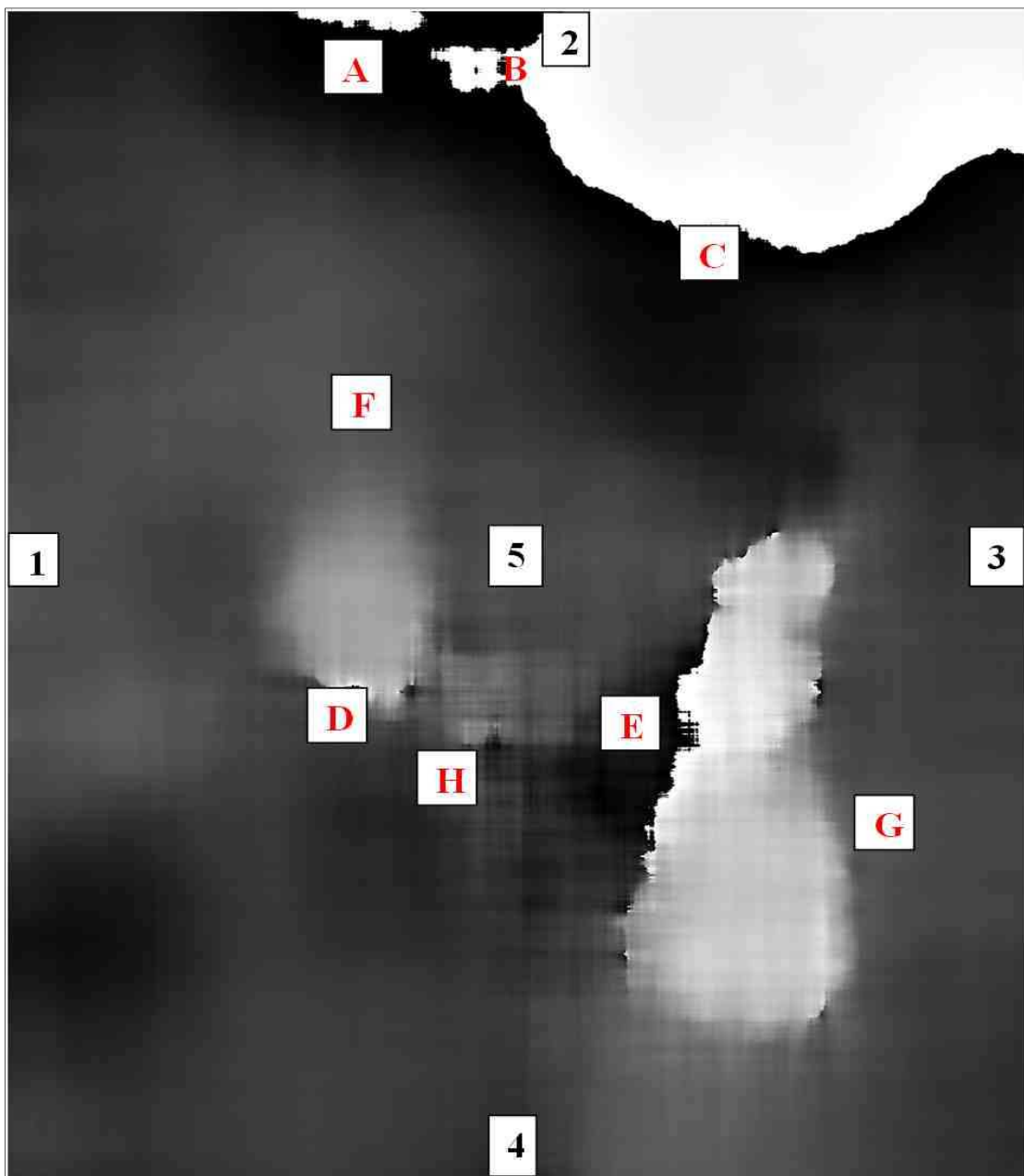


Рисунок 12 – Пример атмосферного фазового экрана

На большей части изображения низкочастотная пространственная фильтрация с использованием фильтра (предположительно) медианного типа [1] обеспечила достаточно эффективное подавление высокочастотных пространственных компонент для свернутой атмосферной фазы. В области скачков свернутой фазы в верхней части изображения программе удалось сохранить резкие границы, однако в ряде мест (А, В, С) возникли локальные структуры явно шумового типа.

В нижней части изображения зафиксированы две достаточно протяженные области овальной формы. На отдельных участках (D, E) сохранены резкие границы. В основном же границы областей размыты (F, G). Кроме того, в промежутке между этими двумя областями Н заметны искажения в виде наборов вертикальных и горизонтальных полос. На рис. 13 в качестве иллюстрации представлено еще три фрагмента – из APS_9 , APS_{11} и APS_{18} .

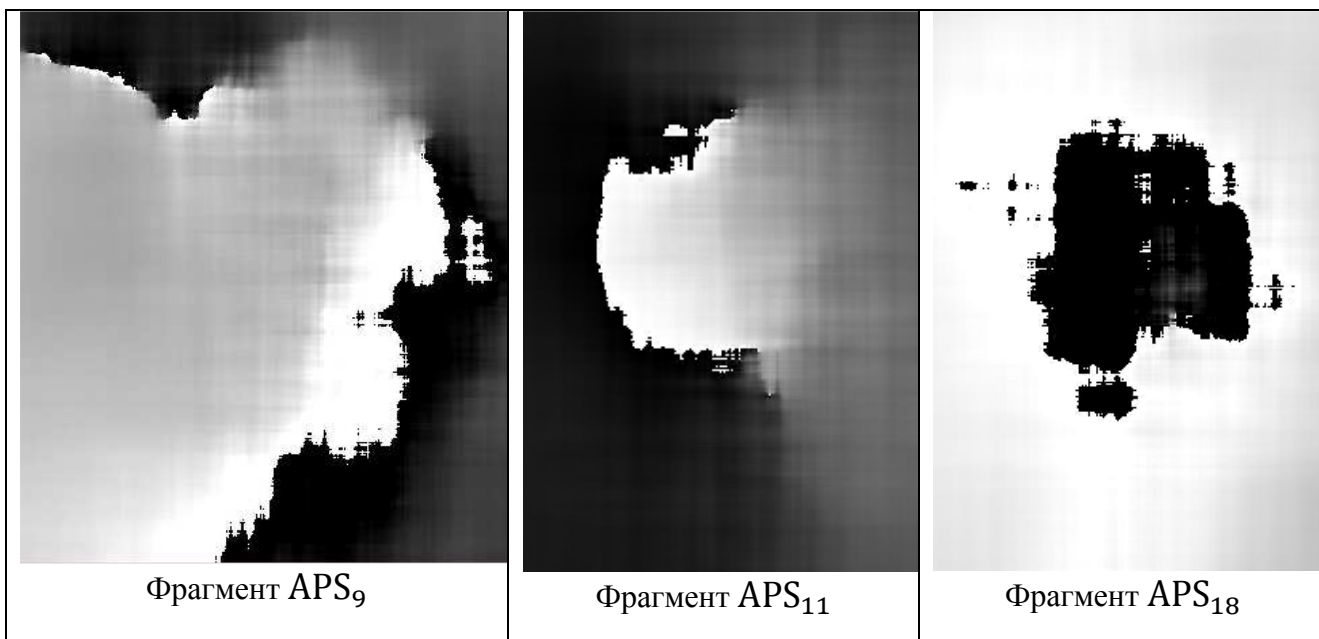


Рисунок 13 – Фрагменты изображений трех атмосферных фазовых экранов

Таким образом, вследствие отказа от развертки атмосферной фазы и необходимости сохранения резких границ в области скачков неразвернутой фазы при проведении низкочастотной пространственной фильтрации в атмосферных фазовых экранах появляется целый набор достаточно

специфических искажений, что может явиться причиной возникновения одиночных выбросов на трендах смещения PS (см. раздел 9).

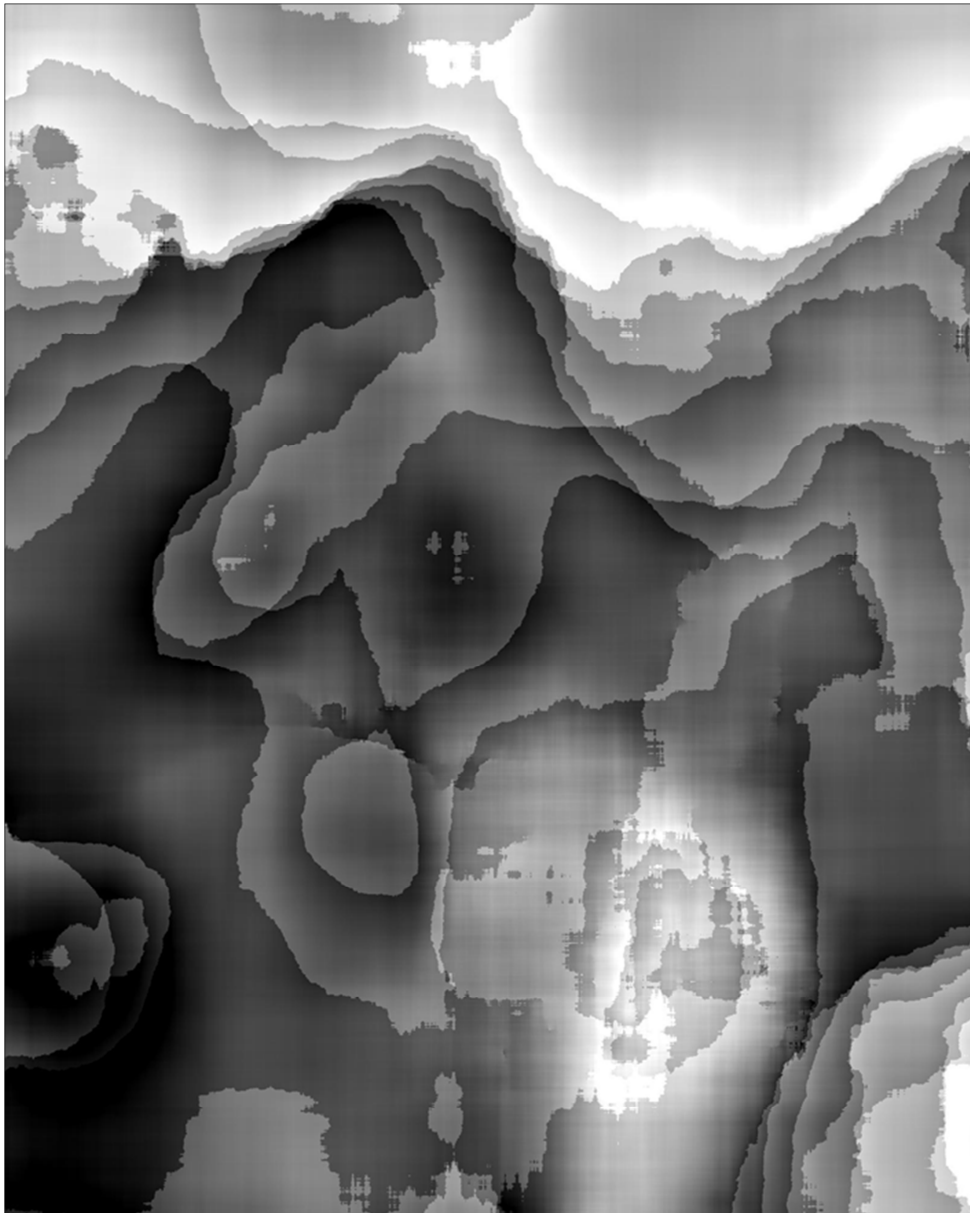


Рисунок 14 – Усредненное изображение APS

Актуальность данной проблемы проиллюстрирована рис. 14, на котором представлено изображение, полученное в результате попиксельного усреднения полного набора из 24 APS. На изображении четко просматривается общая конфигурация всей совокупности границ фазовых разрывов, вблизи которых возможно возникновение фазовых искажений.

Подобные результаты вступают в явное противоречие с исходными принципиально важными утверждениями о том, что для относительно

небольших фрагментов (до $5 \times 5 \text{ км}^2$) атмосферные неоднородности медленно изменяются в пространстве и могут описываться в линейном приближении [1,3,4]. Вопрос нуждается в дополнительном детальном исследовании.

В таблице 5 приведены полученные по набору из 24-х $AP\text{S}_k$ статистические характеристики для атмосферных искажений – средние значения и СКО для значений фазы φ_5 в центральной точке изображения (точка 5 на рис. 12), разность значений фазы $\varphi_1 - \varphi_3$ для точек 1 и 3 (перекос по азимуту) и разность значений $\varphi_2 - \varphi_4$ для точек 2 и 4 (перекос в направлении наклонной дальности). Оценка разностей значений фазы $\varphi_1 - \varphi_3$ и $\varphi_2 - \varphi_4$ проведена с учетом скачков свернутой фазы. Все значения даны в радианах.

Таблица 5 – Статистические характеристики для атмосферных искажений

φ_5		$\varphi_1 - \varphi_3$		$\varphi_2 - \varphi_4$	
Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО
-0,50	1,80	0,46	0,86	-1,01	0,97

8. Об отработке процедуры коррекции поля скоростей

Отработка процедуры коррекции поля скоростей смещений PS с использованием одного и нескольких опорных PS [1] проведена на основе распределения PS, полученного для полного набора из 25 изображений.

Установлено, что получаемые модулем PS результаты расчетов некорректны. О выявленных ошибках работы модуля авторы сообщили разработчикам пакета SARscape.

9. Анализ историй смещения и значений остаточных высот PS

9.1. Анализ зависимости историй смещения PS от количества используемых изображений

В ходе работы проведен анализ зависимости историй смещения трех PS, взятых на разных участках тестового фрагмента (рис. 15) от количества

используемых при проведении обработки изображений. История смещения – это совокупность значений величин смещений, рассчитанных на момент съемки каждого из парных изображений [2].

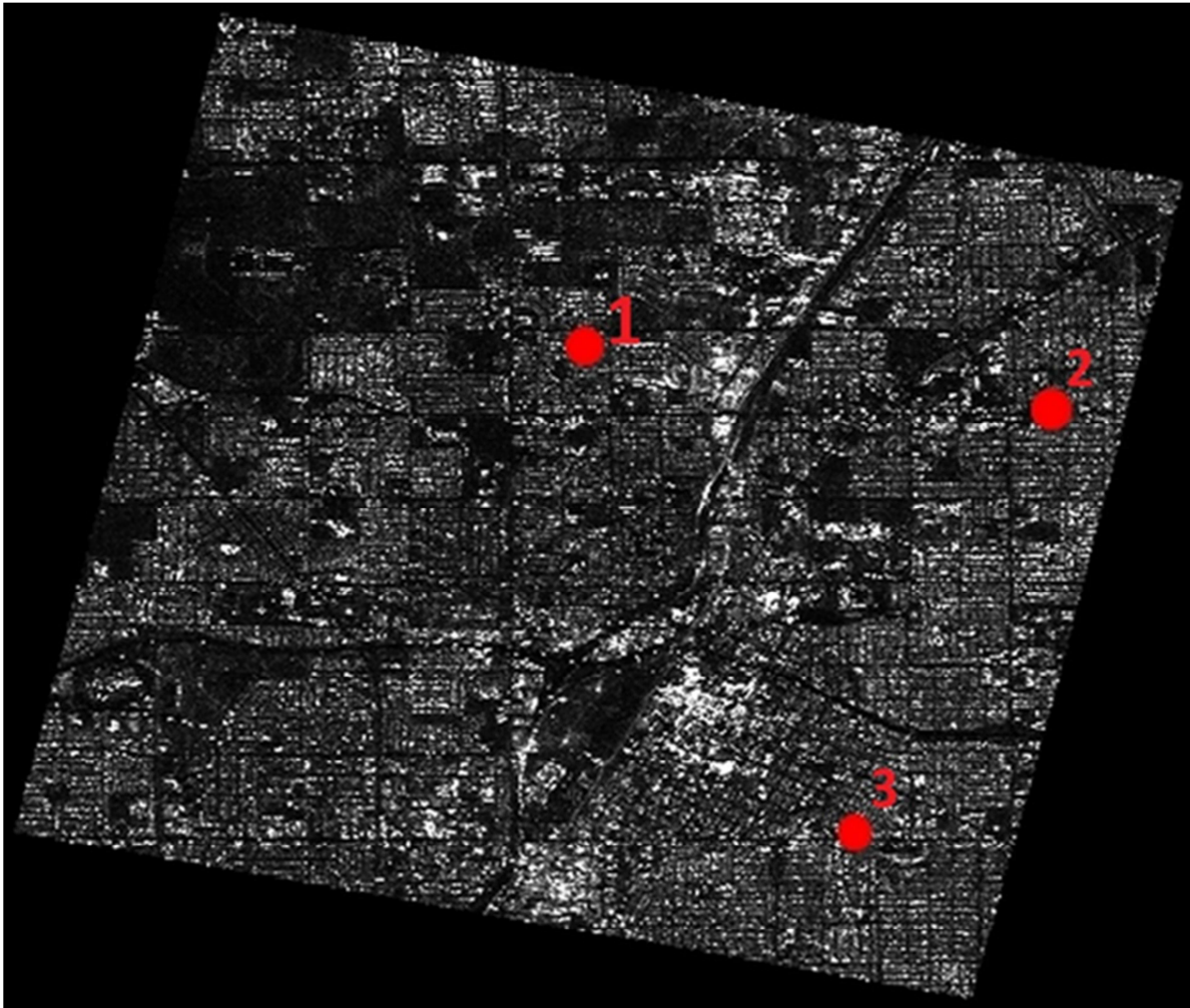


Рисунок 15 – Расположение трех PS на тестовом фрагменте

С целью проведения анализа выбраны PS, однозначно идентифицируемые на распределениях, рассчитанных с использованием наборов из $K=25, 24, 23$ и 22 изображений. Дальнейшее уменьшение количества изображений в наборе привело к существенному изменению конфигурации «сеток» PS, вследствие чего идентификация PS стала невозможной. При этом для всех наборов скорость смещения пикселя с минимальным значением индекса рассеяния амплитуды одинакова, что обеспечивает возможность сопоставления историй смещения без использования процедуры коррекции поля скоростей.

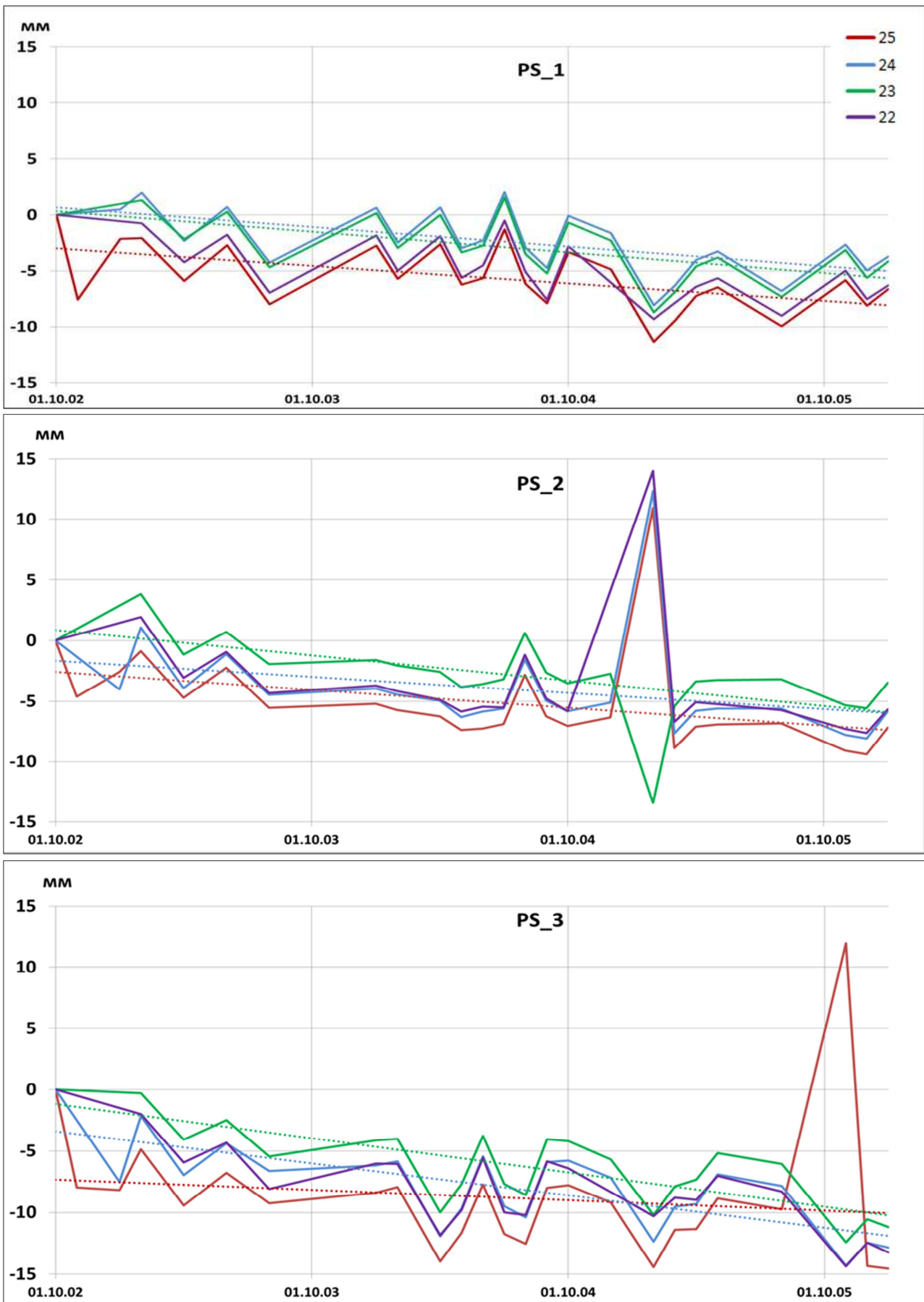


Рисунок 16 – Истории смещения для каждого из трех PS

На рис. 16 представлены графические зависимости для историй смещения трех PS для каждого из четырех наборов изображений К (цвета: К = 22 – фиолетовый, К = 23 – зеленый, К = 24 – синий, К = 25 – красный). При относительно небольшом изменении числа изображений графические зависимости остаются достаточно близкими, но присутствуют проблемы, связанные с возникновением достаточно сильных одиночных «выбросов».

В таблице 6 представлены рассчитанные модулем PS значения скорости смещения трех PS для каждого из четырех наборов изображений. Значения СКО скорости смещения (0,18; 0,02; 0,24 мм/год) значительно ниже величин априорных оценок точности, лежащих в диапазоне 0,8-1,0 мм/год (рис. 10, К = 22 ÷ 25). В столбцах Excel представлены результаты контрольных расчетов, выполненных с использованием функции линейной аппроксимации программы Excel 2010.

Таблица 6 – Сравнение полученных значений скоростей смещений PS

Наборы К	Скорости смещения, мм/год					
	PS 1		PS 2		PS 3	
	SARscape	Excel	SARscape	Excel	SARscape	Excel
22	-0,02	-1,9	-0,02	-1,44	-0,96	-2,92
23	-0,09	-1,83	0,005	-2,08	-0,95	-2,77
24	0,04	-1,75	-0,03	-1,31	-0,69	-2,59
25	0,32	-1,57	-0,002	-1,47	-0,46	-0,84
Среднее	0,06	1,76	-0,01	-1,57	-0,76	-2,28
СКО	0,18	0,14	0,02	0,34	0,24	0,97

Разница между средними значениями скорости смещения PS1, PS2 и PS3 по данным SARscape и Excel равна, соответственно, 1,70; 1,56 и 1,52 мм/год, что заметно превышает уровень априорных оценок точности расчетов скорости смещения PS.

В таблице 7 представлены результаты количественной оценки влияния одиночных “выбросов” (проведены также с использованием функции линейной аппроксимации программы Excel 2010) на величины скорости смещения PS для

пяти "выбросов". Амплитуда "выбросов" меняется от 10 до 24 мм. Общий диапазон изменения скорости смещения при исключении сбойных значений: от -0,29 до 1,49 мм/год.

Таблица 7 – Результаты оценки влияния одиночных “выбросов” на величины скорости смещений PS

Номер PS	Набор, К	Скорости смещений, мм/год		
		Исходные, v_1	После исключения выбросов, v_2	$v_1 - v_2$
PS2	22	-1,44	-2,02	0,58
	23	-2,08	-1,80	-0,29
	24	-1,32	-1,84	0,52
	25	-1,47	-1,98	0,51
PS3	25	-0,84	-2,33	1,49

Важно отметить, что в случае PS2 К=23 знак "выброса" противоположен остальным трем и в результате отличие значения $v_1 - v_2$ от соседних значений по оценкам Excel оказывается равным примерно 0,8 мм/год (см. таблицу 7). С другой стороны, изменение знака "выброса" практически не сказывается на величинах скорости смещений, рассчитанных SARscape – отличие не превышает нескольких сотых долей мм/год (колонка SARscape для PS2 в таблице б).

Установленное относительно небольшое расхождение средних значений скорости смещения PS1, PS2 и PS3 по данным SARscape и Excel может быть объяснено различием алгоритмов, использованных при проведении расчетов скоростей смещений [6]. В SARscape оценка значений скорости смещений проводится в рамках линейной модели, основанной на методике простой периодограммы [1], тогда как функция линейной аппроксимации программы Excel 2010, очевидно, реализована в рамках минимизации среднеквадратичных отклонений. Подобным образом может быть объяснена и установленная низкая "чувствительность" результатов, полученных с использованием SARscape, к влиянию одиночных "выбросов". Объяснить этот факт также можно

предположением, что в используемом в SARscape алгоритме расчета скорости смещения реализована дополнительная процедура поиска и исключения сбойных значений.

9.2. Анализ зависимости значений остаточных высот PS от количества используемых изображений

В таблице 8 представлены рассчитанные модулем PS значения остаточных высот для трех PS (для каждого из четырех наборов изображений).

Рассчитанные СКО значений остаточных высот (0,01; 0,01; 0,03 мм/год) оказались пренебрежимо малыми по сравнению с величинами априорных оценок точности остаточных высот PS, лежащих в диапазоне 0,41-0,43 м (рис. 11, $K = 22 \div 25$).

Таблица 8 – Значения остаточных высот PS

Набор, K	Остаточные высоты, м		
	PS 1	PS 2	PS 3
22	-8,47	-1,89	-5,93
23	-8,45	-1,88	-5,93
24	-8,46	-1,87	-5,93
25	-8,45	-1,85	-5,92
Среднее	-8,46	-1,88	-5,93
СКО	0,01	0,01	0,003

10. Выводы

Экспериментальные исследования возможностей метода постоянных рассеивателей проведены в отсутствие прецизионных подспутниковых данных, вследствие чего основной акцент сделан на исследовании зависимости характеристик выходных продуктов от значений ключевых параметров обработки. При проведении интерпретации полученных результатов возникли дополнительные трудности в связи с отсутствием программной документации по модулю PS программного пакета SARscape, включая описание используемого

алгоритма [1,2]. Основные особенности метода, реализованного в программном пакете SARscape, удалось установить только в результате комплексного детального анализа литературных источников [3,4], программной документации [2], а также [6].

Результаты проведенного анализа зависимости времени обработки T_K от количества используемых изображений K позволили подтвердить, что с ростом последнего время обработки монотонно возрастает, причем в относительных единицах зависимость оказалась линейной, с тангенсом угла наклона близким к 45° [2].

Показано, что с увеличением количества изображений K в наборе происходит резкое уменьшение количества обнаруженных постоянных рассеивателей N_{PS} , что противоречит выводам, сделанным в [2]. Этот результат не может быть объяснен с позиций модельных зависимостей выборочных значений когерентности от истинных значений когерентности [5].

Предварительный анализ ситуации, связанной с возникновением одиночного "выброса" на зависимости $N_{PS}(K)$ позволил получить ряд таких трудно интерпретируемых результатов, как аномально сильная зависимость N_{PS} от выбора изображения, исключаемого на данном этапе обработки, а также слабая зависимость времени обработки от N_{PS} , что противоречит [2].

Показано, что, в противоречие с выводами, сделанными в [3,4], нарушения временной и пространственной однородности в двумерном распределении параметров съемки слабо сказались на времени обработки (однако привели к резкому увеличению количества обнаруженных PS).

Показано, что вследствие (1) отказа от развертки атмосферной фазы и (2) необходимости сохранения резких границ в области скачков неразвернутой фазы формируемые модулем PS атмосферные фазовые экраны содержат фазовые искажения, что может явиться причиной возникновения "выбросов" на трендах смещения PS.

Ввиду выявленных программных ошибок отработка процедуры коррекции

сдвига поля скоростей с использованием одного и нескольких опорных PS оказалась невозможной.

Установлено, что при увеличении K от 15 до 25 имело место монотонное возрастание значений априорных оценок точности расчетов скоростей смещения PS и остаточных высот PS – диапазоны изменения $0,8 \div 1,25$ мм/год и $0,4 \div 0,5$ метра, соответственно (ввиду выявленных программных ошибок сопоставление априорных и апостериорных оценок точности проведено не было). Анализ зависимости историй смещения трех PS от количества используемых изображений показал, что при изменении числа изображений K от 22 до 25, зависимости остаются достаточно близкими, СКО значений скорости смещения и остаточных высот значительно ниже величин априорных оценок. Тот факт, что все границы представленных диапазонов изменения для оценок скорости смещения и остаточных высот лежат вблизи одного мм/год и одного метра, соответственно, является косвенным подтверждением возможности получения ЦММ с метровой, а ЦКС с миллиметровой точностью.

Полученные теоретические и практические результаты показывают, что при условии проведения дополнительных наземных работ по верификации получаемых результатов возможно применение метода PS при решении целого ряда прикладных задач при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов инфраструктуры, в т.ч. критически важных объектов.

Обработка данных космической радиолокационной съемки методом PS позволяет в значительной степени автоматизировать процесс получения информации о смещениях объектов на земной поверхности. Использование существующих программных реализаций метода, например, модуля PS программного пакета SARscape, позволит решить задачу разработки и реализации технологии решения различных прикладных задач на базе программно-аппаратных средств НЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы». Изначальный учет результатов представленной работы при проведении обработки радиолокационных данных методом PS позволяет

повысить точность получаемых величин смещений объектов и сократить временные затраты на обработку.

Литература

1. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Денисов П.В., Гусев М.А. Исследование зависимости результатов обработки радиолокационных данных ДЗЗ от параметров обработки. Часть 1. Ключевые моменты метода постоянных рассеивателей // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], в печати.
2. Exploring the SARscape Modulus for ENVI // ITT Visual Information Solutions. Pearl East Circle. Boulder CO. – 2010. – P. 223.
3. Ferretti A., Prati C., and Rocca F., 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing – Vol. 38. – PP. 2202-2212.
4. Ferretti A., Prati C., and Rocca F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, – Vol. 39. – PP. 8-20.
5. Touzi R., Lopes A., Bruniquel J., and Vachon P.W.. Coherence Estimation for SAR Imagery // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1999. – Vol. 37. – PP. 135-149.
6. Defilippi M. Private communication.