

УДК 621.396.967:551.242

© Коллектив авторов

А.Ф. Мухамедгалиев, М.Г. Разакова, В.В. Смирнов, Б.Э. Бекмухамедов

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДВИЖЕК ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Увеличение разрешающей способности антенн с синтезированной апертурой, установленных на космических аппаратах, вызвало интерес к более детальному использованию результатов полученных с применением таких антенн для радиолокационного зондирования земли. Комплекс соответствующей аппаратуры называют SAR-системами, по аналогии с космическим сенсором Synthetic aperture radar, установленным на космическом аппарате.

По сравнению с оптико-электронными устройствами, SAR-системы обладают целым рядом преимуществ, главное из которых всепогодность, т.е. возможность наблюдения земной территории в сплошную облачность и даже ночью. Это делает SAR-системы весьма востребованными для оперативного космического мониторинга.

В настоящее время все большее распространение среди космических средств определения вертикальных и горизонтальных перемещений земной поверхности получает радиолокационная интерферометрия, при которой анализируется амплитуда и фаза сигнала, отраженного от поверхности. При этом одно изображение, сделанное с помощью SAR-системы, в большинстве случаев не имеет практического значения, тогда как два разновременных снимка (интерференционная пара) эффективно используются для решения задачи дифференциальной интерферометрии.

Преимущество интерферометрического метода заключается в возможности получать информацию о подвижках земной поверхности для больших территорий (до 3000 кв. км), а не только в конкретных точках, при измерениях наземными геодезическими приборами. Данный метод эффективен и экономически, так как исключается выполнение дорогостоящих геодезических полевых работ [1]. Периодичность получения радарных данных с космических спутников может колебаться от 11 до 45 дней, в зависимости от типа космического аппарата.

Спутниковая радиолокационная интерферометрия является методом дистанционного зондирования, обеспечивающим высокую точность определения высот и смещений за счет использования фазовой компоненты сигнала.

Каждое радиолокационное изображение содержит амплитудный и фазовый слой. Амплитудный слой в основном используется для осуществления географической привязки снимков, а по фазовой компоненте можно получить информацию о произошедших за время между съемками деформационных изменениях исследуемой поверхности. Результирующая фаза  $\Phi$ , полученная в ходе интерферометрической обработки фазовых слоев интерферометрической пары, состоит из следующих компонентов:

$$\Phi = \Phi_{\text{topo}} + \Phi_{\text{def}} + \Phi_{\text{atm}} + \Phi_{\text{n}}, \quad (1)$$

где:  $\Phi_{\text{topo}}$  – фазовый набег за счет обзора топографии под двумя разными углами;  $\Phi_{\text{def}}$  – фазовый набег за счет смещения поверхности в период между съемками;  $\Phi_{\text{atm}}$  – фазовый набег за счет различия длин оптических путей из-за преломления в среде распространения сигнала;  $\Phi_{\text{n}}$  – вариации фазы в результате электромагнитного шума.

Слагаемое  $\Phi_{\text{def}}$  в выражении (1) не зависит от орбитальных параметров, а определяется только длиной волны и величиной смещения в направлении луча обзора.

Это свойство интерферометрической разности фаз позволяет измерять подвижки земной поверхности на величины, сравнимые с длиной волны радиолокатора, т.е., на сантиметры или даже миллиметры. Для получения абсолютных значений подвижки исследуемого участка земной поверхности необходимо исключить влияние топографической компоненты  $\Phi_{\text{topo}}$  из полной фазы интерферограммы. Из-за необходимости вычитания топографической компоненты из полной фазы интерферограммы для получения величины  $\Phi_{\text{def}}$  этот метод получил название дифференциальной интерферометрии (ДИ).

Методом ДИ можно определять величины смещений земной поверхности путем вычитания из интерферограммы топографической компоненты опорной *цифровой модели рельефа* (ЦМР). При этом, чем выше точность опорного рельефа по высоте, тем увереннее определяются смещения и отфильтровываются фазовые помехи, повышается когерентность. Для максимально корректного разделения фазы опорного рельефа и фазы смещений земной поверхности необходима ЦМР наиболее

близкая по времени к данным, используемым для интерферометрической обработки. Для построения актуальной на данный момент ЦМР использовался метод радарной интерферометрии.

Для отработки технологии обнаружения подвижек земной поверхности методом дифференциальной интерферометрии в качестве тестового участка была выбрана территория корпорации Казахмыс, на которой проводилась интенсивная подземная разработка рудных месторождений, что явилось причиной возникновения деформаций рельефа, просадок и обвалов почвы (рис. 1). Исследуемая область охватывает четыре планшета стотысячного масштаба.

На выбранном участке с 70-х годов велись топографо-геодезические работы по наблюдению за оседанием грунта в связи с интенсивной разработкой рудных месторождений [1]. По данным топографо-геодезических измерений по фиксированным реперным точкам тестового участка было выявлено, что скорость оседания грунта в отдельных точках достигает до 1 см в месяц.

В результате проведенного анализа технических характеристик космических систем нового поколения, для решения задачи дифференциальной

интерферометрии было решено воспользоваться данными, полученными аппаратами Cosmo-SkyMed и TerraSAR-X в различных временных режимах.

Съемка космическим аппаратом Cosmo-SkyMed проводилась с временной базой 16 дней в течение периода весна-лето 2012 года. Положительными факторами такой съемки являются: получение значительного количества тандемных пар радиолокационных изображений; высокая когерентность; малая декорреляция радиолокационных данных.

Схема покрытия территории тестового участка радиолокационными данными Cosmo-SkyMed изображена на рис. 2. Даты съемки показаны в табл. 1.

Из многопроходной съемки с космического аппарата TerraSAR-X была выбрана интерферометрическая пара с наименьшей базовой линией. Даты съемки выбранной пары приведены в табл. 2.

Для достижения необходимой точности элементов ЦМР использовалась многопроходная съемка тестового участка с использованием радиолокационных данных космического аппарата Cosmo-SkyMed. Из всех заказанных радарных снимков было выбрано четыре, по которым были построены интерферометрическим методом три ЦМР. Для оптимальности

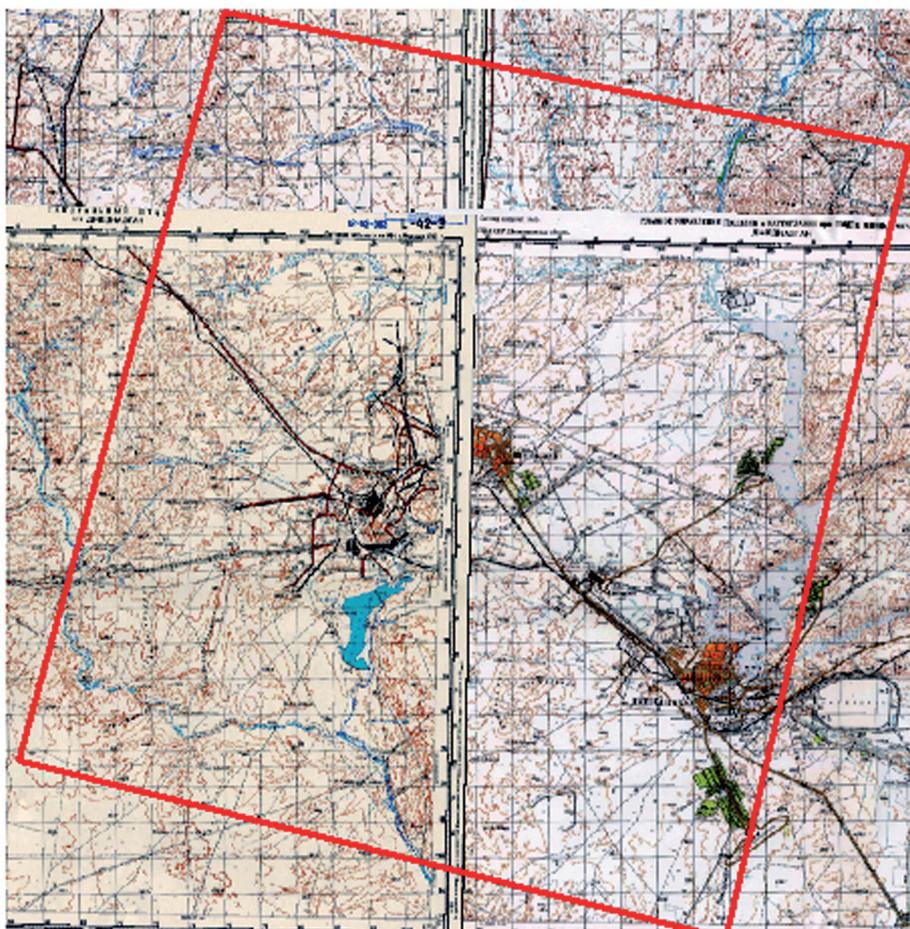


Рис. 1. Картограмма тестового участка

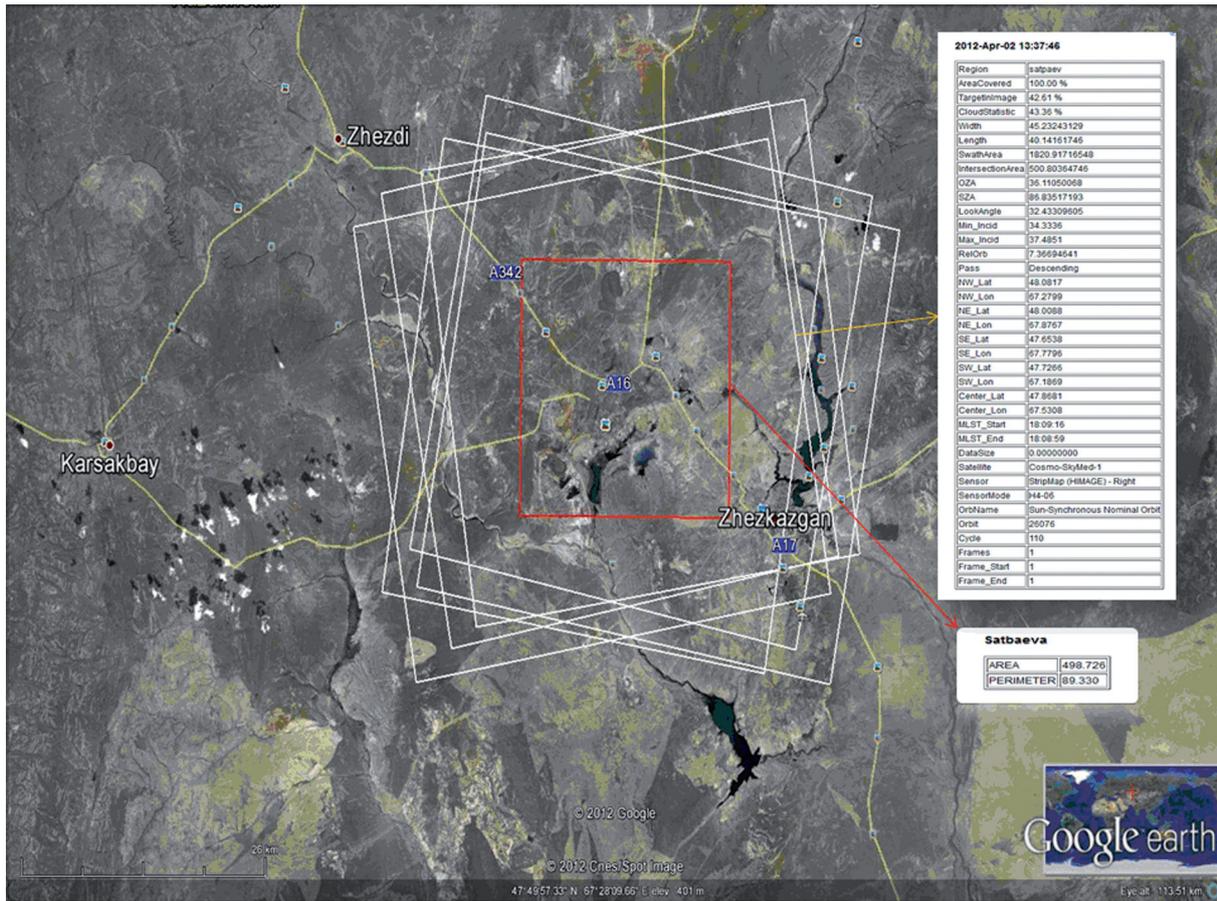


Рис. 2. Схема покрытия тестового полигона данными радиолокационного зондирования Cosmo-SkyMed

Таблица 1

Режим многопроходной съемки Cosmo-SkyMed

Космический аппарат	Дата	Территория
Cosmo-SkyMed	2012 04 06	Сагпаев
Cosmo-SkyMed	2012 04 22	Сагпаев
Cosmo-SkyMed	2012 05 08	Сагпаев
Cosmo-SkyMed	2012 05 24	Сагпаев
Cosmo-SkyMed	2012 06 10	Сагпаев
Cosmo-SkyMed	2012 05 26	Сагпаев

Таблица 2

Режим съемки TerraSAR-X

Космический аппарат	Дата	Территория
TerraSAR-X	2011 10 18	Сагпаев
TerraSAR-X	2012 08 10	Сагпаев

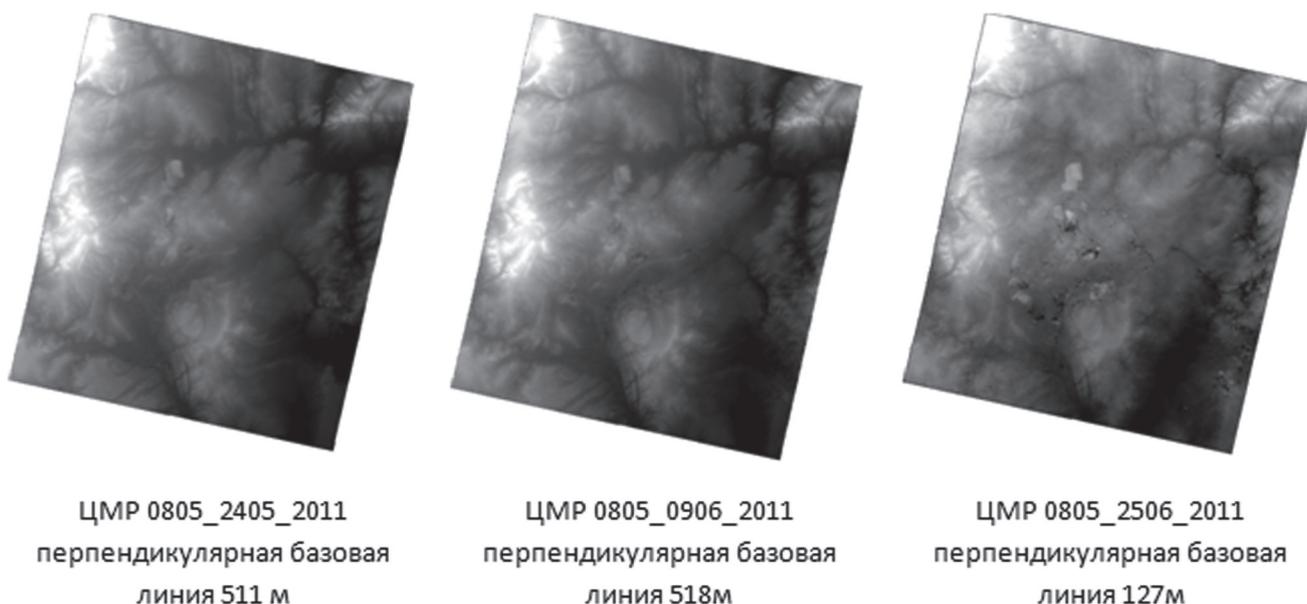


Рис. 3. ЦМР, построенные по интерферометрическим парам данных Cosmo-SkyMed с разными временными базами

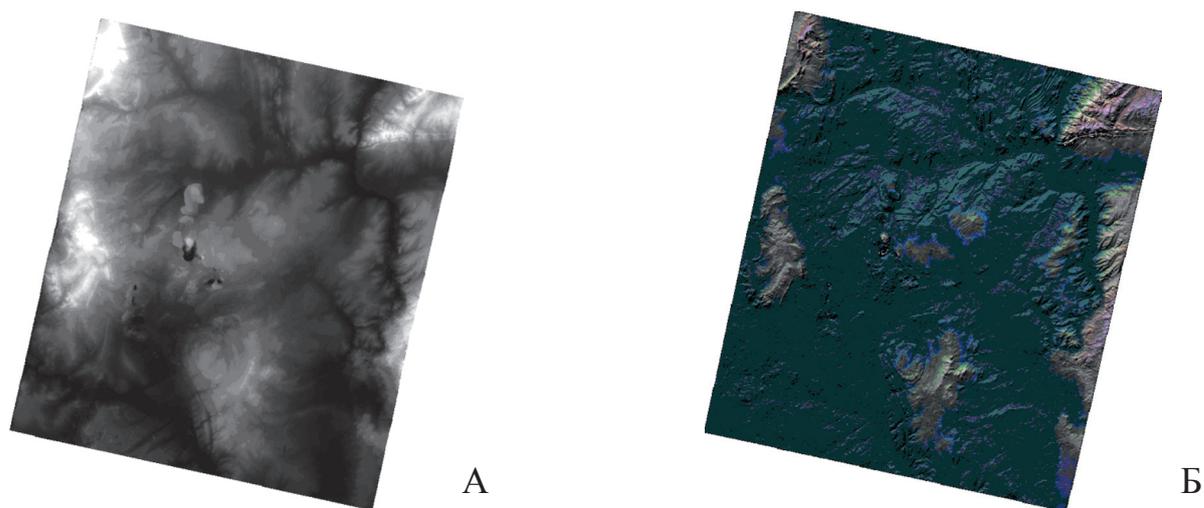


Рис. 4. ЦМР, построенные по данным Cosmo-SkyMed: А – черно-белая палитра, Б – цветная палитра для лучшего визуального восприятия

сочетания интерферометрических фаз пары выбирались итерационным методом путем подбора временной и пространственной базы. Следует отметить, что минимальное значение пространственной базы (расстояние между двумя радиолокационными сенсорами) определяло лучшую детальность радиолокационных изображений (рис. 3).

Итоговый рельеф (рис. 4) был получен усреднением по трем интерферометрическим парам, что значительно повысило точность результирующей ЦМР.

Построенная ЦМР, в плане, практически полностью совпадает с топографической картой

масштаба 1:100 000, что говорит о ее высокой точности (рис. 5).

Построенная ЦМР была использована для разделения фазы опорного рельефа и фазы смещений земной поверхности с целью получения абсолютных значений смещений земной поверхности на тестовом участке.

Выявление смещений земной поверхности проводилось с использованием радарных снимков с космического аппарата TerraSAR-X с временной базой девять месяцев.

Для расчетов была отобрана интерферометрическая пара радиолокационных снимков за 18 октября 2011 г. и 10 августа 2012 г.

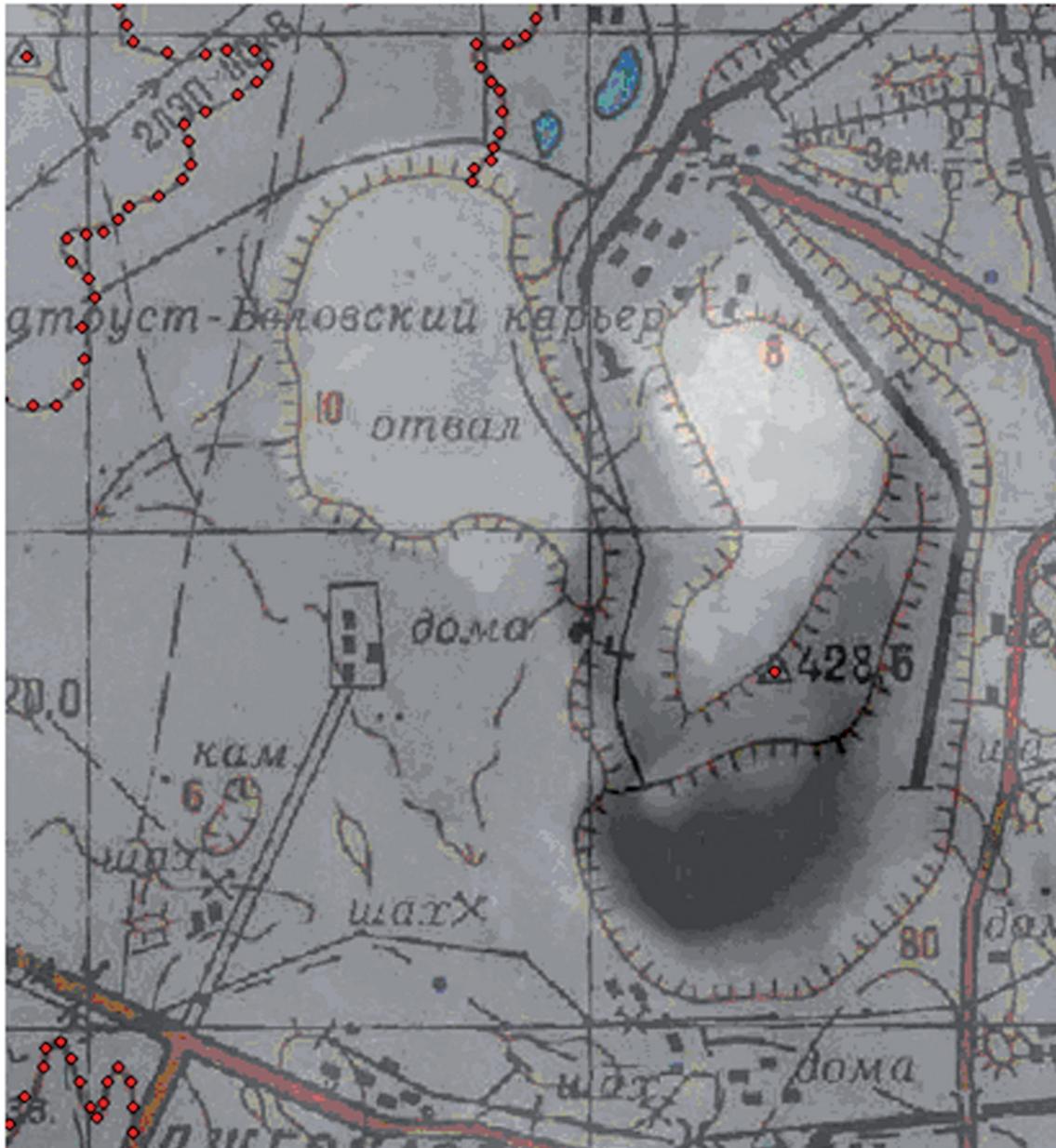


Рис. 5. Исследуемая методом интерферометрии область на фоне 100 000 планшетов

Для мониторинга смещений земной поверхности методами ДИ были получены многопроходные пары радиолокационных космических снимков космических аппаратов Cosmo-SkyMed (5 сцен), и TerraSar-X (5 сцен) по которым были построены ЦМР и интерферограмма (рис. 6).

При этом тандемная пара космических снимков космического аппарата (КА) Cosmo-SkyMed с максимальной величиной базовой линии (1031 м) использовалась для построения цифровой модели рельефа (ЦМР), а тандемная пара КА TerraSar-X с минимальным значением базовой линии (200 м) – для генерации интерферограммы.

Генерация интерферограммы и построение ЦМР осуществлялись в программном комплексе

ERDAS Imagine2011 с использованием модуля InSAR.

Построенная ЦМР послужила основой для разделения фазы опорного рельефа и фазы смещений земной поверхности с целью получения абсолютных значений смещений земной поверхности на тестовом участке.

После проведения операций:

- фильтрации интерферограммы,
- разделения компонентов фазы  $\Phi_{topo}$  и  $\Phi_{def}$ ,
- развертки фазы (процедура перехода от относительных значений фазы к абсолютным величинам смещений) –

по полученной интерферограмме построена карта смещений земной поверхности на тестовом участке

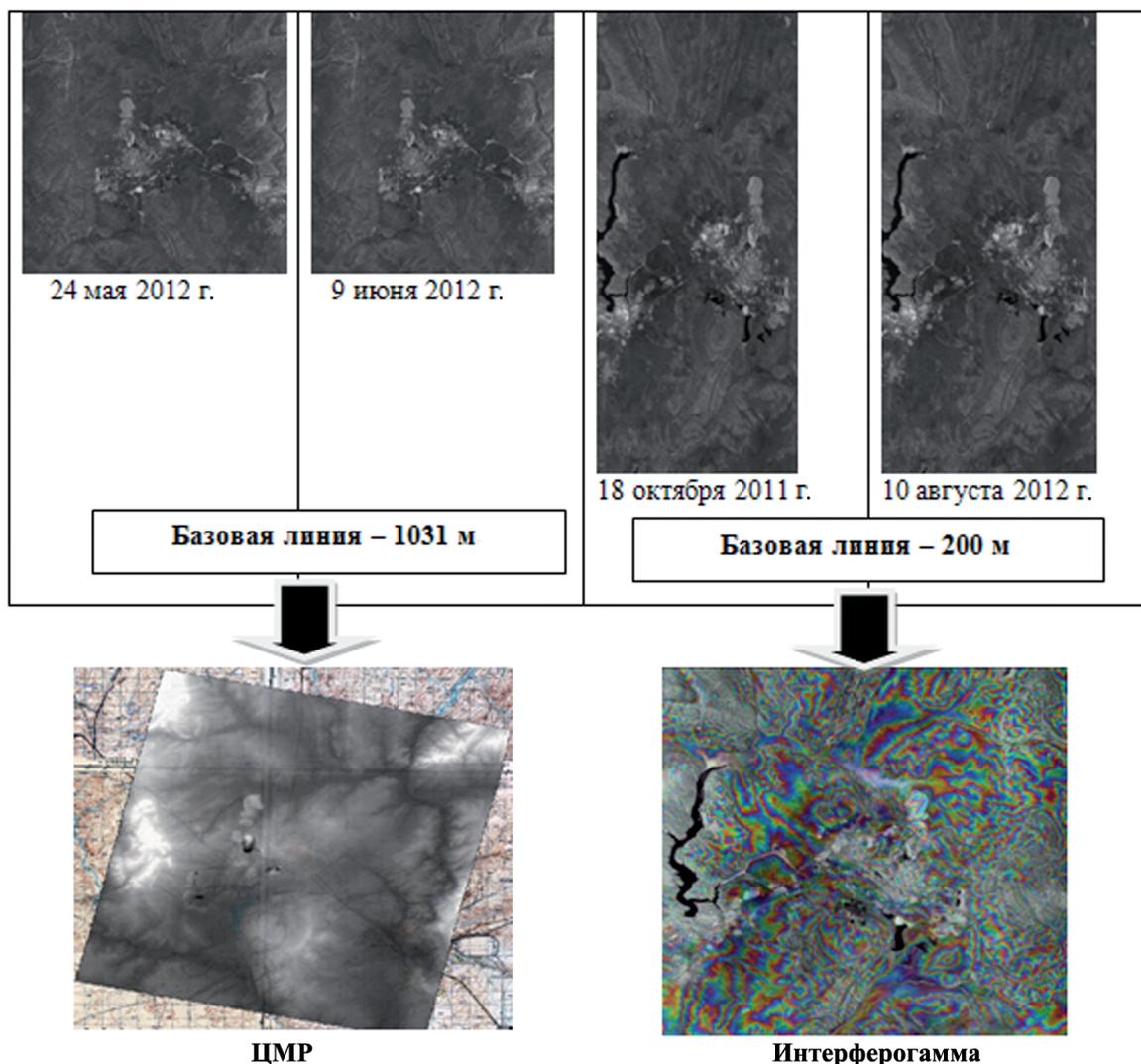


Рис. 6. Генерация ЦМР и интерферограммы

(рис. 7). Контурные показывают величины вертикальных смещений в сантиметрах.

Сопоставление результатов проседаний земной поверхности, полученных методом дифференциальной интерферометрии, с данными маркшейдерских измерений за период 1968-2011 гг. по профилю [1-33] показало достаточно высокую корреляцию. На рис. 8 приведена схема расположения профиля [1-33] на результирующей карте смещений, полученной из интерферометрических измерений, и величины смещений вдоль этого профиля. По данным интерферометрических измерений в точке репера 27 абсолютная величина просадки земной поверхности с октября 2011 г. по август 2012 г. составила 0,8 см, а по наземным измерениям это значение равно 1 см.

В заключение отметим, что точность методов дифференциальной интерферометрии для решения задачи мониторинга подвижек земной поверхности зависит от параметров космической съемки. Поэтому необходимо иметь набор не менее

чем из пяти снимков для возможности осуществления выбора наиболее коррелирующихся между собой снимков.

**Ключевые слова:** радарная съемка из космоса, дифференциальная интерферометрия, смещение земной поверхности.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Чернова И.Ю., Нугманов И.И., Лунова О.В., Даутов А.Н., Чернова О.С. Мониторинг смещений земной поверхности на территории юго-востока республики Татарстан по данным космических радарных съемок // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – №1 (9). – С. 2458-2464.
2. Мансуров В.А., Сатов М.Ж., Жантуев Р.Т., Кантемиров Ю.И. Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности и сооружений на Жезказганском месторождении меди // GEOMATICS – 2012. – № 1(14). – С. 77-83.

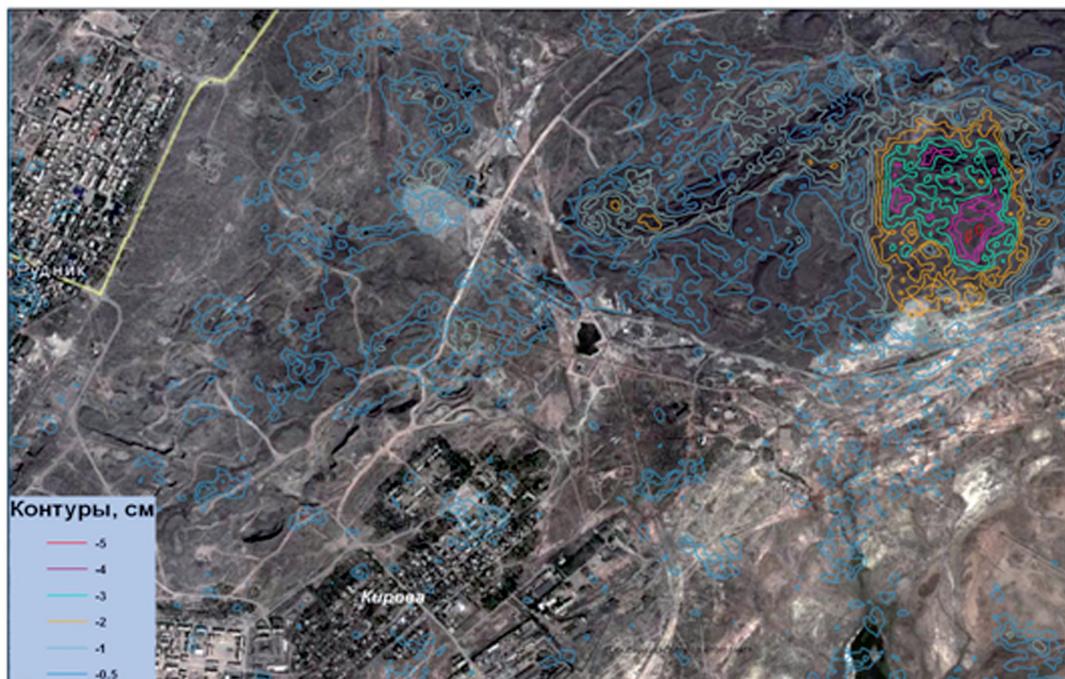


Рис. 7. Карта смещений земной поверхности на тестовом участке

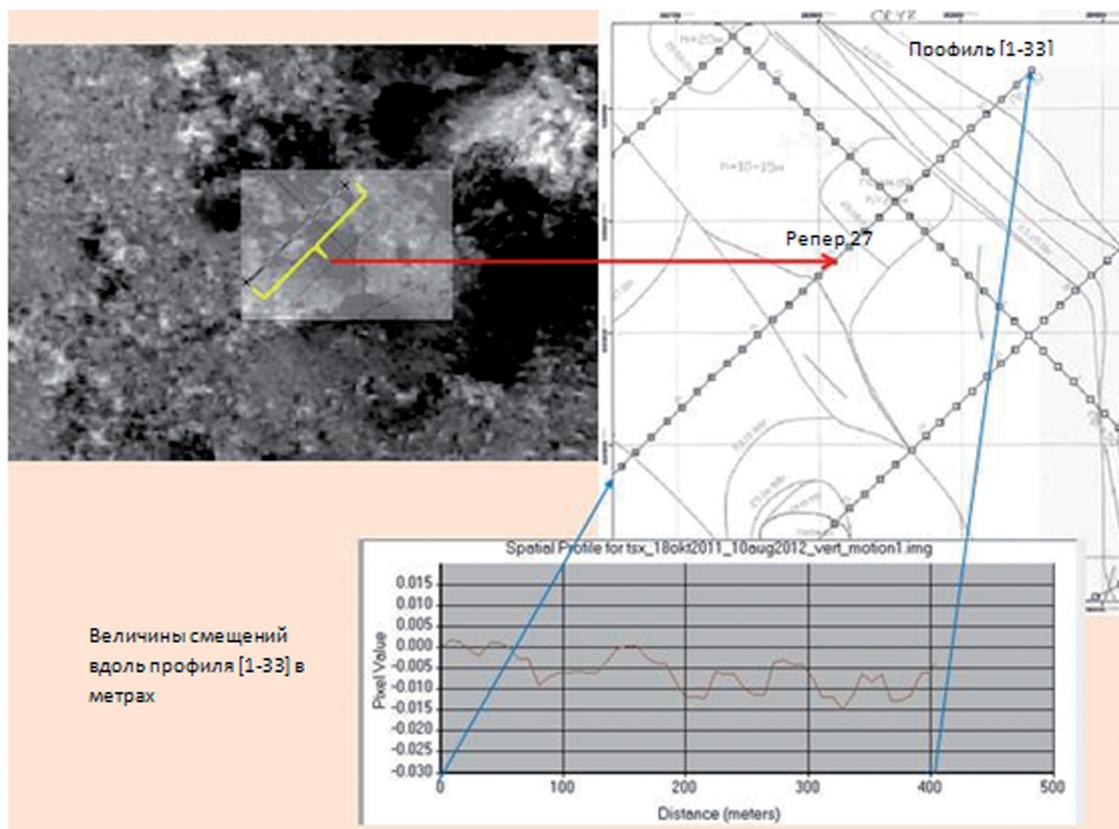


Рис. 8. Сопоставление результатов проседаний земной поверхности полученных методом дифференциальной интерферометрии и наземными измерениями