

УДК 622.834.1

## ОЦЕНКА СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕТОДОМ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Гавриленко Ю. Н., Петрушин А. Г., Ковалев К. В.  
(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

*У роботі розглянуто теоретичні основи обробки радіолокаційних зображень з метою вибору оптимального способу для отримання якісної і кількісної картини мульди зрушення при підземній розробці пластових вугільних родовищ. Наведено опис створеного полігону для натурних маркшейдерських спостережень, який стане еталоном для порівняння з даними обробки інтерферометрії і дозволить оцінити точність і можливість застосування радіолокаційної зйомки для спостереження за деформаціями денної поверхні в маркшейдерії.*

*In the paper discusses the theoretical basis processing methods of radar images in order to select the optimal to obtain a qualitative and quantitative picture of the displacement as a result of underground mining of coal fields. Descriptions of the testing firing field for field surveying observations that will become a benchmark for comparison with the data processing of interferometry. This will assess the accuracy and applicability of radar imagery to monitor the deformation of the surface in mine surveying.*

**Актуальность.** В настоящее время применение данных дистанционного зондирования для анализа рельефа местности является одной из актуальных тенденций для множества отраслей человеческой деятельности, таких как картография, строительство, промышленность и научные исследования. Одним из важных ас-

пектов практического применения спутниковых радиолокаторов является мониторинг смещений земной поверхности по результатам дифференциальной обработки двух и более радиолокационных изображений, полученных при почти одинаковой геометрии съёмки.

На практике, при определении сдвижений и деформаций земной поверхности для получения данных техногенного влияния подземных горных выработок традиционно используются натурные маркшейдерские наблюдения, физическое и математическое моделирование. Моделирование подразумевает использование той или иной теории развития процесса сдвижения массива горных пород и с определенной ошибкой позволяет получить исследуемые величины. При этом всегда существует вероятность, что модель не сможет отразить реальные горно-геологические условия, и результат будет не соответствовать фактическим процессам. С этой точки зрения, натурные маркшейдерские наблюдения, являются наиболее достоверными, так как позволяют получить фактические величины. Данный метод имеет высокую трудоемкость и, как правило, не позволяет оценить всю мульду сдвижения, а только какую-то её часть. Вся мульда восстанавливается по данным натурных наблюдений, используя существующие теории, что, в свою очередь, также может привести к неправильным результатам, учитывая принятые в теории допущения.

Использование космических радиолокационных станций (РЛС) является эффективным методом оценки рельефа Земли на больших площадях. Как показано в работах [1-3], дифференциальная обработка данных радиолокационных изображений (РЛИ) позволяет определять вертикальные смещения земной поверхности на уровне единиц сантиметров. Это открывает широкие перспективы использования РЛС для более глубокого изучения процессов сдвижения земной поверхности и мониторинга состояния объектов на обширных территориях. Очевидными достоинствами данного подхода являются снижение трудоемкости, так как основной этап работ будет сведен к закреплению сигнальных точек и определению их координат для целей привязки к картографической информации, и получение комплексной картины техногенного воздействия, охватывающей всю зону влияния.

**Цель и задачи.** Целью данной работы является оценка возможности применения РЛС для мониторинга сдвижений и деформаций земной поверхности в результате подземной разработки пластовых угольных месторождений с необходимой точностью.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить теоретические основы обработки РЛИ. Это необходимо для учета влияния негативных факторов и формирования требований к выполнению съемки (например, геометрия бокового обзора, разрешение, углы наблюдения и пересечения, радиометрия, спектр, съемка на одной длине волны при когерентном излучении, наличие спекл-шума).
2. Выбрать оптимальный способ обработки РЛИ для получения качественной и количественной картины мульды сдвижения.
3. Создать полигон для натурных маркшейдерских наблюдений в зоне влияния подземных горных работ и выполнить на нем наблюдения до начала процесса сдвижения и в его течении. Результаты натурных наблюдений будут эталоном для сравнения с данными обработки РЛИ и позволят оценить точность и возможность применения РЛС для мониторинга деформаций дневной поверхности в маркшейдерии.

Учитывая, что в отечественной практике радиолокационная интерферометрия пока не нашла применения для мониторинга сдвижений и деформаций, то имеет смысл рассмотреть подходы и методы к обработке и анализу РЛИ.

**Методы обработки РЛИ.** Согласно [4] для тематической обработки радиолокационных снимков используются три метода.

*Поляриметрия* – метод физических исследований, основанный на измерении степени поляризации электромагнитных волн и угла поворота плоскости поляризации, их изменении. Принятые сенсором поляризационное состояние и энергия отраженных от поверхности волн несут информацию об облучаемом участке. При помощи поляриметрического радара изменения характери-

стик волн могут быть зарегистрированы и соотнесены с био- и геофизическим параметрами. Далее выполняется обработка данных с применением различных статистических методов.

*Радарграмметрия* (радарное стереокартирование) – представляет собой технику обработки информации, получаемой со спутника. Фиксируемые сенсором на космическом аппарате амплитуды отраженных волн от одного и того же участка земли (стереопара) определенным образом складываются и применяются для создания цифровой модели рельефа. Зная характеристики спутника, производящего съемку (высоту и наклон орбиты, разрешение), получают данные об исследуемом участке.

*Интерферометрия (радиолокация с синтезированной апертурой)* – фиксирует амплитуду и фазу отраженного сигнала. Одно изображение, полученное с помощью радара с синтезированной апертурой (РСА), в большинстве случаев не имеет практического значения, тогда как два снимка (интерференционная пара), полученные под различными углами, могут быть использованы для получения цифровой модели рельефа, которая, в свою очередь, может дать информацию об изменениях ландшафта и улучшить разрешение.

Применительно к радиолокационным съемкам ориентация базовой линии вдоль или поперёк направления движения носителя РСА определяет тип интерферометрических измерений, так что можно говорить о продольной и поперечной интерферометрии.

Технология продольной интерферометрии основана на измерениях, проводимых в плоскости, параллельной движению носителя РСА. В этом случае обрабатываются сигналы, полученные одновременно от двух антенн, разнесённых вдоль линии пути радиолокатора. Такие измерения позволяют обнаруживать движущиеся объекты на фоне подстилающей поверхности и измерять их скорость. Для поперечной интерферометрии две или более антенны должны быть разнесены в плоскости, перпендикулярной направлению полёта носителя РСА. Совместная обработка фазовой информации, получаемой двумя антеннами одновременно или через промежуток времени, позволяет восстанавливать рельеф подстилающей поверхности.

Интерферометрия комбинирует комплексные изображения, зафиксированные антеннами под различными углами наблюдения или в разное время. По результатам сравнения двух снимков одного и того же участка местности получают интерферограмму, представляющую собой сеть цветных полос, ширина которых соответствует разности фаз по обеим экспозициям. Благодаря высокой частоте излучения подвижки регистрируются с точностью миллиметры – первые сантиметры. Все данные съемок представляются в цифровом виде, что обеспечивает объективность и однозначность интерпретации. Интерферометрия является альтернативой традиционной стереофотографической технике для создания топографических карт с высоким разрешением вне зависимости от погодных условий и времени суток при съемке. При этом используется монохроматический подход, т.е. электромагнитные волны, излучаемые с космического аппарата, должны описываться периодической во времени функцией.

Каждая точка комплексного снимка может быть описана в общем виде функцией вида:

$$Z(x, y) = I(x, y) \cdot e^{i\varphi(x, y)}, \quad (1)$$

где  $I$  – интенсивность сигнала, приходящаяся на точку,  
 $\varphi$  – фаза точки;  
 $x, y$  – координаты точки.

«Перемножение» снимков в каждой точке дает:

$$P(x, y) = Z_1(x, y) \cdot Z_2^*(x, y) = I'(x, y) \cdot e^{i\Delta\varphi(x, y)}, \quad (2)$$

где  $I'$  – интерферометрическая интенсивность точки;  
\* – комплексное сопряжение;  
 $\Delta\varphi(x, y)$  – интерферометрическая фаза.

На практике полученные изображения  $Z_1$  и  $Z_2$  могут различаться из-за вносимых, например, атмосферой, погрешностей.

Коэффициент когерентности  $g$  между ними может быть введен как:

$$g(x, y) = \frac{\langle Z_1(x, y) \cdot Z_2^*(x, y) \rangle}{\sqrt{\langle |Z_1(x, y)|^2 \cdot |Z_2(x, y)|^2 \rangle}} \quad (3)$$

Разница фаз (интерферометрическая фаза) между двумя соответствующими друг другу точками на интерференционной паре пропорциональна разности хода  $2 \cdot (r_0 - r_1) = 2 \cdot \Delta r$  (коэффициент 2 указывает на двойное прохождение пути волнами) и равна  $4\Delta r \pi / \lambda$ , где  $\lambda$  – длина излученной волны. Разность хода волны  $\Delta r$  много больше длины волны (в большинстве практических случаев, различие в пути от спутника может быть порядка нескольких сотен метров, тогда как используемая длина волны имеет длину нескольких сантиметров), и разность фаз может интерпретироваться неоднозначно.

На рисунке 1 показаны положения двух сенсоров РСА ( $S_1$  и  $S_2$ ) и их параллельное ( $B_r$ ) и нормальное ( $B_n$ ) смещение относительно линии наблюдения.

Также указано расположение двух точек участка  $P_1$  и  $P_2$  и их смещения, нормальное  $n_p$  и параллельное  $r_p$  по отношению к линии наблюдения. Основным будем считать положение сенсора  $S_1$  с соответствующей точкой  $P_1$  с расстоянием между ними  $r_0$ . При изменении положения РСА, расстояние между участком поверхности и датчиком изменится:

$$r = \sqrt{(r_0 + r_p - B_r)^2 + (n_p - B_n)^2} . \quad (4)$$

В случае, когда расстояние между двумя антеннами  $S_1$  и  $S_2$  мало по сравнению с  $r_0$ , можно записать изменение интерферометрической фазы в приближенном виде:

$$\Delta \varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta(\Delta r) = \frac{4\pi \cdot B_n \cdot n_p}{\lambda \cdot r_0} . \quad (5)$$

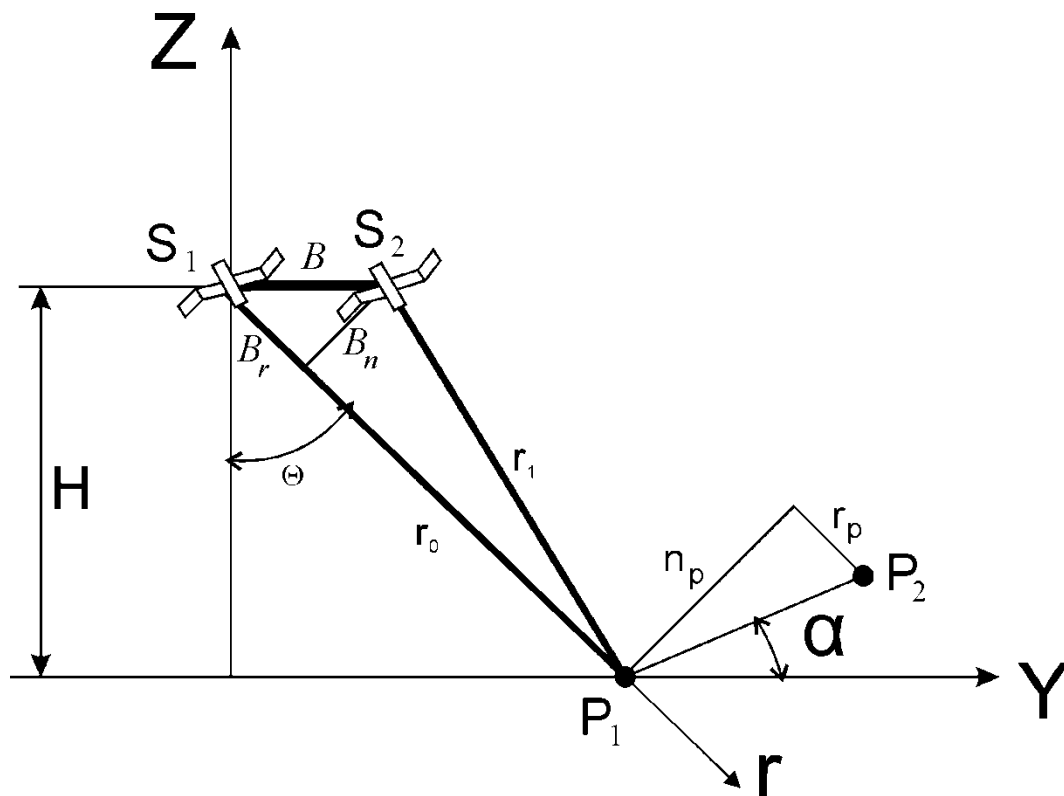


Рис. 1. Схема расположения сенсоров РСА при интерференционных измерениях

Этот результат позволяет сделать вывод о том, что если известно относительное смещение двух орбит нормально к линии наблюдения  $B_n$ , расстояние  $r_0$  и длину волны, используемую при локации, тогда величина  $\Delta\varphi$  зависит только лишь от  $n_p$ .

Таким образом, интерференционное изображение фазы представляет собой карту относительного возвышения ландшафта вдоль линии наблюдения. После некоторых преобразований, уравнение (5) можно переписать в виде:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi \cdot B_n \cdot q}{\lambda \cdot r_0 \cdot \sin \Theta} = 2\pi \frac{q}{q_0}, \quad (6)$$

где  $q = \Delta z$  – относительное возвышение;

$$q_0 = \frac{2 \cdot B_n}{\lambda \cdot r_0 \cdot \sin \Theta}.$$

Очевидно, что уравнение (6) содержит в себе неоднозначность, связанную с вычислением значения периодической функ-

ции  $e^{i\Delta\varphi}$ . Интерферометрическая фаза может быть определена в интервале от  $-\pi$  до  $+\pi$ , но ее действительная величина может выходить за эти пределы. Развертка фазы позволяет восстановить истинное ее значение посредством добавления или вычитания величины, кратной  $2\pi$ , к фазе  $\Delta\varphi$  таким образом, чтобы сделать соответствующую фазовую картину максимально гладкой. Развертку фазы несложно выполнять для участков поверхности с высокой когерентностью. Часто, алгоритмы развертки оставляют «отверстия», где они не могут определить фактическую фазу, но, тем не менее, эта операция позволяет получить весьма точное представление о топографии поверхности.

Из рисунка 2 следует, что горизонтальное положение точек относительно начальной точки отсчета зависит от координат  $S_1$  и  $P_1$  и их возвышения относительно начального уровня.

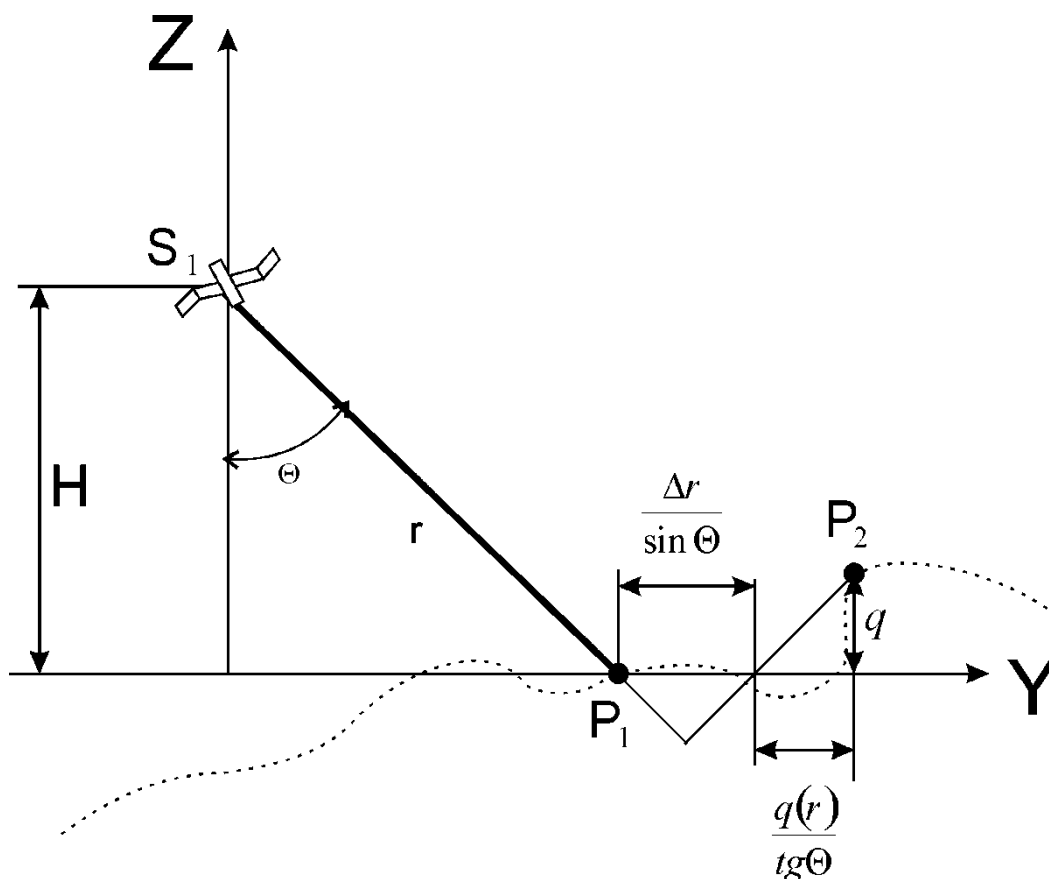


Рис. 2. Схема расчета горизонтального положения точек



Простые геометрические построения позволяют найти между ними связь:

$$y(r, q) = \frac{\Delta r}{\sin \Theta} + \frac{q(r)}{\operatorname{tg} \Theta}. \quad (7)$$

С помощью функции (7) строится так называемая цифровая модель рельефа (Digital Elevation Model). К ее построению также применяются корреляционные функции, описывающие влияние атмосферы, температурные эффекты, рассмотрение которых выходит за пределы данной работы. Следует, однако, заметить, что таким образом получается карта земной поверхности, включающая в себя строения, леса и т.д.

*Дифференциальная интерферометрия* основана на обработке двух и более радиолокационных снимков, снятых с двух близких параллельных орбит космического аппарата (расстояние между сенсорами около 300 м).

Существует несколько вариантов организации таких съёмок (табл. 1): однопроходная интерферометрия, когда одна антенна (работающая на передачу и приём сигнала) находится на борту, а вторая (только для приёма) помещена на конце длинной мачты, таким образом, расстояние между антеннами остаётся постоянным, и происходит одновременная съёмка двух изображений; в двухпроходной схеме съёмки, или съёмке с повторяющихся орбит, второе изображение снимается через некоторое время после первого с того же самого спутника, или, в тандемных миссиях, с другого. РСА-изображение может быть представлено в виде двумерной матрицы комплексных отсчётов, координаты отсчётов называются азимутом (направлена вдоль траектории носителя) и наклонной дальностью (ориентирована поперёк трассы). Поскольку положение двух приёмных антенн в пространстве несколько различно, необходимо высокоточное совмещение двух изображений.

Первые два РЛИ используются, чтобы получить интерферограмму топографии ландшафта, используя основную интерферометрическую методику. Точно так же РЛИ, полученные при следующем прохождении спутников, используются для получения следующей интерферограммы той же самой области.

Таблица 1

Зависимость решаемых задач от количества формируемых  
 интерферометрических пар

Тип интерферометрической съёмки в зависимости от количества проходов	Конфигурация системы РСА	Решаемая задача
Однопроходная съёмка (одна пара снимков)	РСА с «жёсткой базой» или два РСА с одной антенной на параллельных траекториях	Построение ЦМР
Двухпроходная съёмка (одна пара снимков)	РСА с одной антенной	Построение ЦМР. Оценка смещений при наличии ЦМР
Трёхпроходная съёмка (одна пара снимков)	РСА с одной антенной	Оценка кратковременных смещений
Четырёхпроходная съёмка (одна пара снимков)	РСА с одной антенной	Оценка кратковременных смещений
Многопроходная съёмка – постоянный мониторинг поверхности (десятки – сотни пар снимков)	РСА с одной антенной	Оценка долговременных смещений

Разность фаз  $\Delta\varphi$ , соответствующая изменению рельефа, пропорциональна смещению  $\Delta S$  вдоль линии наблюдения и распространения электромагнитных волн, и уравнение (6) может быть переписано в виде:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_t + \Delta\varphi_n = \frac{4\pi \cdot B_n \cdot n_p}{\lambda \cdot r_o} + \frac{2\Delta S}{\lambda}. \quad (8)$$

Т.е., смещение, не зависит от орбитальных параметров, а только от длины волны и величины смещения  $\Delta S$  в направлении луча обзора. Это свойство интерферометрической разности фаз позволяет измерять подвижки на расстояния, сравнимые с длиной волны радиолокатора, т.е. на сантиметры или даже миллиметры, тогда как точность цифровой модели рельефа исчисляется в самом лучшем случае в дециметрах. Из-за необходимости вычитания топографической компоненты из полной фазы интерферо-

граммы для получения величины смещения этот метод и получил название дифференциальная интерферометрия.

Самый простой способ оценки смещений и временных изменений состоит в использовании пары спутниковых изображений, сделанных с некоторым интервалом времени.

Две интерферограммы позволяют увидеть любые изменения, которые произошли на поверхности Земли (рис. 3 [5]).

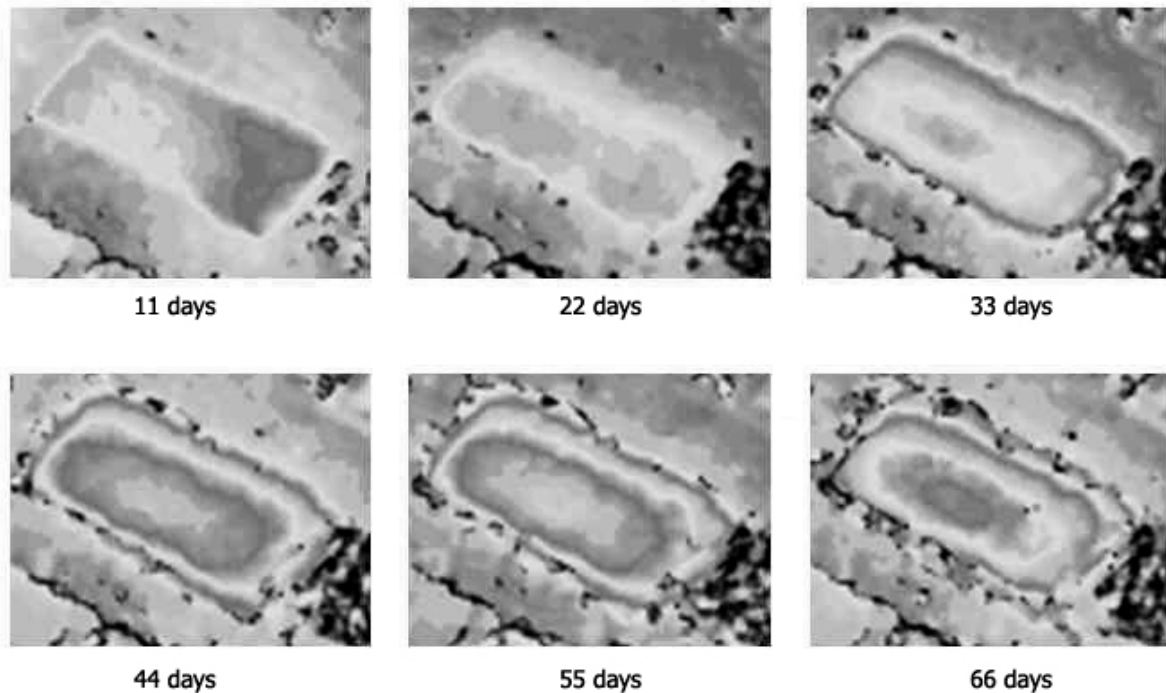


Рис. 3. Осадка в зоне строительства здания (каждое изменение градации серого соответствует оседаниям, равным половине длины волны – 1,55 см)

Дифференциальная интерферометрия позволяет определять на малых масштабах смещение земной поверхности, а также отслеживать изменение характеристик радиосигналов из-за смены влажности почвы (проблемы подтопления).

Для получения достоверных результатов необходимо выполнение некоторых условий, таких, как выведение спутника для повторной экспозиции в область космического пространства, близкую к первому снимку; один сезон съемки (хоть и в разные

годы) для соблюдения сходного состояния отражающей поверхности (растительный покров, гидрогеологические условия).

С точки зрения поставленных задач оптимальным вариантом обработки РЛИ для мониторинга сдвижений и деформаций земной поверхности является именно дифференциальная интерферометрия.

**Искажения РЛИ.** Искажения на космических радиолокационных изображениях местности делятся на две группы: *радиометрические искажения*, нарушающие соответствие уровня входного сигнала отражающим свойствам целей (их эффективной поверхности рассеивания) и ухудшающие наблюдаемость целей и *геометрические искажения*, ухудшающие точность измерения координат объектов по радиолокационному снимку и затрудняющие проведение картографических работ.

Источниками искажений являются:

- аппаратные нестабильности и искажения, связанные с прохождением сигналов через тракт РСА;
- нестабильности траектории движения носителя РЛС;
- затухание сигналов, фазовые и поляризационные нестабильности в трассе распространения сигналов;
- нестабильности отражающих свойств объектов, движение подстилающей поверхности (море, растительность).

Для космических РСА основной траекторный фактор – ошибки измерения параметров относительного движения и ошибки ориентации космического аппарата.

Одной из особенностей изображений, получаемых космическими РСА, является неравномерность фона, обусловленная когерентным спекл-шумом. Первопричиной пятнистости изображения однородной поверхности является когерентное сложение откликов от большого количества элементарных отражателей, находящихся в пределах одного поверхностного элемента разрешения и изменение их состава при переходе от одного элемента к другому. Спекл-шум может использоваться для идентификации пространственно-распределенных объектов и оценивания некоторых характеристик РСА, однако в подавляющем большинстве случаев он является нежелательным фактором и затрудняет де-

шифровку РЛИ (может привести к ложному обнаружению точечных целей или к пропуску слабоконтрастных объектов).

Таким образом, на качество формирования интерферограммы влияет множество факторов. Большинство из них может быть сгруппировано по следующим разделам:

- точность определения параметров орбиты (знание базовой линии, непараллельность орбит и т.д.);
- характеристики самой спутниковой системы (угол обзора, пространственное разрешение, системные шумы);
- характеристики радиолокационного сигнала (частота, поляризация, соотношение сигнал/шум);
- атмосферные влияния и погодные условия (скорость ветра, снежный покров, облачность и т.д.);
- свойства поверхности (электрические характеристики, локальный наклон рельефа).

В настоящее время методы радиолокационной интерферометрии успешно применяются для оценки сдвижений в районах нефтедобычи [1, 2, 3, 6], динамики оползневых и карстовых процессов [7, 8]. Подобный опыт зарубежных исследователей, открывает перспективы использования радиолокационных методов для мониторинга деформаций земной поверхности и при подземной добыче угля из пластовых месторождений с целью защиты подрабатываемых объектов.

Для оценки возможностей РСА в задачах определения качественных и количественных параметров мульды сдвижения был создан экспериментальный полигон, представляющий собой площадную наблюдательную станцию в зоне влияния 1-й восточной лавы шахты «Октябрьский рудник» ДУЭК «ДонУголь». Станция состоит из 12 пунктов, на которых выполнены GPS наблюдения до начала процесса сдвижения (рис. 4). Векторы наблюдений строились с учетом получения геодезических четырехугольников, центральных систем, что позволит после уравнивания повысить жесткость системы в целом. Всего было измерено около 30 векторов.

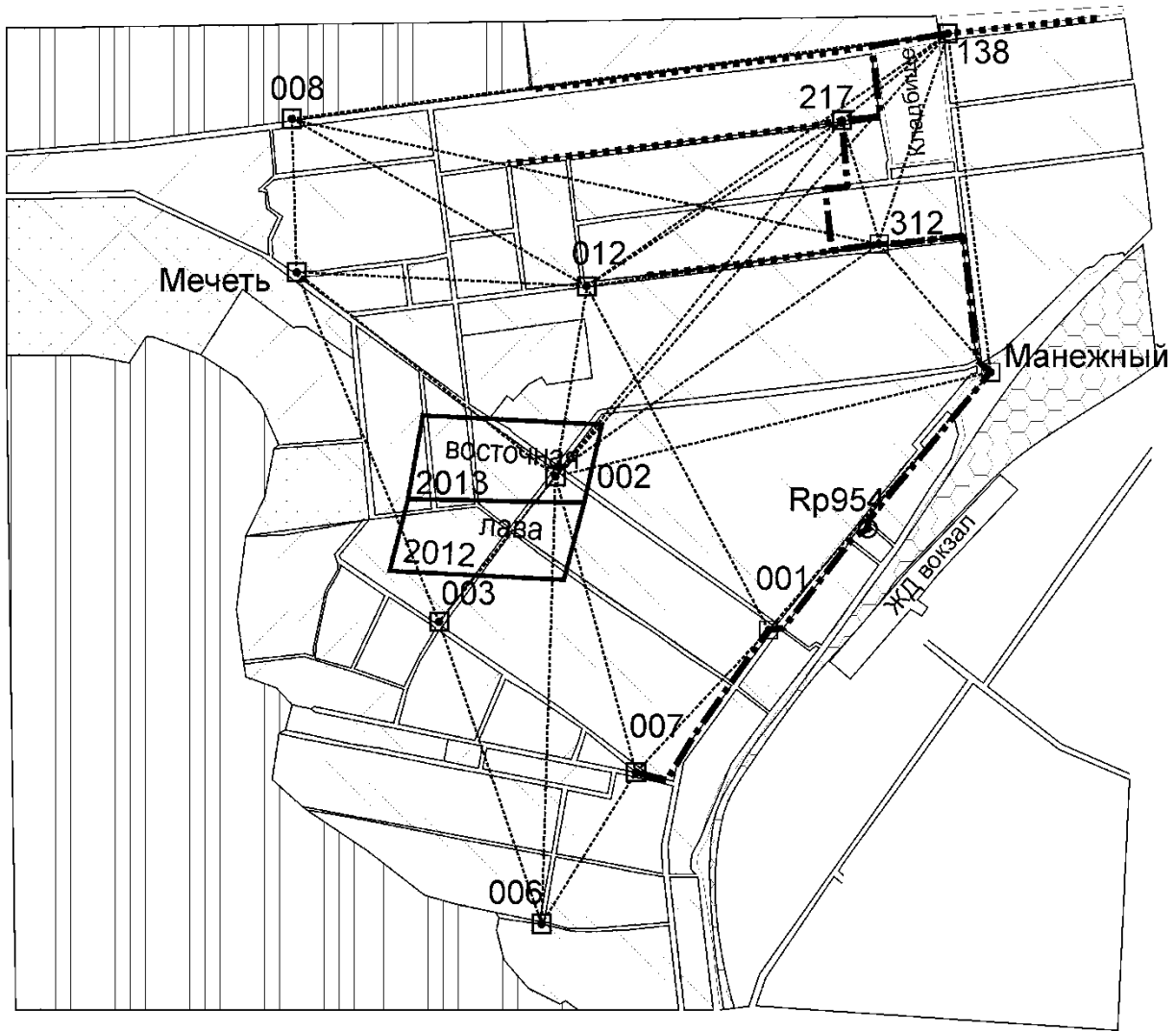


Рис. 4. Схема экспериментального полигона

На участке полигона ранее существовали долговременные маркшейдерские наблюдательные станции в виде профильных линий. Их репера были включены в общую сеть, исходя из со-

хранности их положения. Это позволит включить качественные и количественные данные многолетних наблюдений в общий процесс анализа процесса сдвижения, используя выявленные ранее закономерности для данного региона. Также по точкам экспериментального полигона было выполнено нивелирование II класса для получения поправок за высоту в GPS наблюдения и дополнительного контроля системы.

Территория полигона в основном представляет собой одноэтажную приусадебную застройку и открытую местность, т.е. отсутствие объектов и сооружений земной поверхности; присутствует крупное тектоническое нарушение пликативного типа. Это позволит оценить влияние достаточно большого количества внешних факторов на результаты интерферометрии.

В настоящий момент ведутся работы по получению нескольких серий спутниковых радиолокационных наблюдений.

В результате выполненной работы можно сделать следующие выводы:

Зарубежный опыт радиолокационной интерферометрии по определению деформаций земной поверхности на нефтегазовых месторождениях, величина которых сопоставима со значениями для закрытых и закрывающихся угольных шахт, позволяет сделать заключение о возможности и перспективности применения интерферометрии для мониторинга земной поверхности при разработке подземных угольных пластовых месторождений.

Для целей мониторинга сдвижений и деформаций подрабатываемой земной поверхности целесообразно применить метод дифференциальной радиолокационной интерферометрии, так как она позволит отследить величины до нескольких миллиметров.

Экспериментальный полигон позволит практически оценить точность получаемых в результате обработки РЛИ величин и выявить степень и качество влияющих факторов.

## СПИСОК ССЫЛОК

1. А. В. Евтюшкин, А. В. Филатов. Оценка деформаций земной поверхности в районах интенсивной нефтедобычи Западной Сибири методом РСА интерферометрии по данным

- ENVISAR и ALOS/PALSAR. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. Выпуск 6. Том 2. — М. : ООО «Азбука-2000», 2009. — С. 46—53.
2. Ю. Б. Баранов, Ю. И. Кантемиров, Е. В. Киселевский, М. А. Болсуновский. Мониторинг смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов с помощью комплекса космических и геодезических методов. // Геоматика, № 1, 2008. — С. 51—55.
  3. И. А. Лысков, В. В. Мухин, Ю. А. Кашников. Мониторинг деформационных процессов земной поверхности методами радарной интерферометрии. // Вестник ПГТУ Геология. Нефтегазовое и горное дело, № 5. — 2010. — С. 11—16.
  4. <http://www.gis.gorodok.net>.
  5. <http://www.sarmap.ch/page.php?page=landdisplacement>.
  6. А. И. Захаров, Л. Н. Захарова. Применение интерферометрии для мониторинга районов добычи и транспортировки нефти и газа // Рогтех, № 5. — 2006. — С. 58—67.
  7. А. И. Захаров, Л. Н. Захарова, М. А. Лебедева. Применение РСА-интерферометрии для мониторинга транспортной инфраструктуры в зонах с опасной динамикой покровов // Журнал радиоэлектроники, № 10, — 2010. — С. 32—38.
  8. А. И. Захаров, Н. Н. Хренов. Радиолокационные интерферометрические методы наблюдения Земли в задаче мониторинга подвижек газопроводов. // Газовая промышленность, № 3, — 2004. — С. 44—48.