

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.94.52.002

УДК 528.88:528.8.044.2

© Л. С. Миков, В. П. Потапов, 2024

Л. С. МИКОВ

младший научный сотрудник
Федеральный исследовательский центр
информационных и вычислительных технологий,
г. Кемерово
e-mail: mikov@ict.sbras.ru



В. П. ПОТАПОВ

д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник
Федеральный исследовательский
центр информационных и вычислительных
технологий, г. Кемерово
Институт горного дела СО РАН, г. Новосибирск



ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ РАДАРНЫХ ДАННЫХ

Статья посвящена применению методов обработки спутниковых радарных данных для мониторинга геодинамических процессов в районах интенсивной угледобычи. В работе рассматриваются как фазовая, так и амплитудная составляющие радарного сигнала. Для анализа фазовых изменений, неразрывно связанных с вертикальными смещениями, описаны такие методы обработки, как дифференциальная интерферометрия, SBaS (Small Baseline subset) и PS (Persistent Scatterers). Также представлен алгоритм REACTIV, позволяющий анализировать амплитудные изменения для оценки изменений состояния земной поверхности. Продемонстрированы примеры применения этих методов на реальных данных для мониторинга горнопромышленных объектов и оценки геодинамической обстановки в Кузбассе.

Ключевые слова: ГЕОДИНАМИКА, ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, РАДАРНЫЕ ДАННЫЕ, РАДАРНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ, СПУТНИКОВЫЙ РАДАРНЫЙ МОНИТОРИНГ, СМЕЩЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, МЕТОД МАЛЫХ БАЗОВЫХ ЛИНИЙ, МЕТОД УСТОЙЧИВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ, ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ.

ВВЕДЕНИЕ

Геодинамические процессы, охватывающие движения и деформации земной коры, играют ключевую роль в формировании ландшафта и распределении природных ресурсов. От столкновения континентов до постепенного поднятия горных хребтов эти процессы оказывают глубокое влияние на нашу планету. В контексте горнодобывающей промышленности понимание геодинамики приобретает особую важность, поскольку добыча полезных ископаемых неизбежно

воздействует на окружающую среду, вызывая техногенные изменения в земной коре.

Добыча угля, как и других твердых полезных ископаемых, часто сопровождается значительными геодинамическими последствиями. Извлечение огромных объемов породы из недр Земли приводит к изменению напряженного состояния горных пород, что может вызвать оползни, просадки грунта, трещиноватость и даже землетрясения [1]. Эти явления представляют серьезную угрозу для безопасности горнодобывающих предприятий,

инфраструктуры и окружающей среды. В свою очередь, горные работы многогранно влияют на окружающую среду:

- деградация ландшафта; разработка месторождений приводит к изменению рельефа местности, разрушению растительного покрова и нарушениям гидрологического режима;

- риски для населения; просадки грунта и оползни могут привести к разрушению жилых домов и инфраструктуры, а также угрожать жизни людей.

Для минимизации рисков и обеспечения устойчивого развития горнодобывающей промышленности необходимо эффективно проводить мониторинг геодинамических процессов.

Данная статья посвящена исследованию применения спутниковых радарных данных как современной технологии для мониторинга геодинамических процессов в местах добычи полезных ископаемых.

В век стремительно развивающихся технологий дистанционного зондирования Земли спутниковая радарная технология (SAR) занимает особое место. В отличие от оптических датчиков, SAR-системы способны получать изображения независимо от погодных условий и времени суток, проникая сквозь облака и туман. Это свойство, наряду с высокой разрешающей способностью и возможностью получения информации о высоте поверхности, делает SAR-данные уникальным инструментом для решения широкого спектра задач в различных областях.

В последние годы наблюдается экспоненциальный рост объёмов доступных радарных данных, а также активное развитие алгоритмов их обработки. Это открывает новые возможности для применения SAR-технологии в таких областях, как мониторинг окружающей среды, управление природными ресурсами, оценка ущерба от стихийных бедствий.

ОПИСАНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Спутниковые радарные данные представляют собой сложный сигнал, несущий в себе богатую информацию о поверхности Земли.

Этот сигнал можно разложить на две основные составляющие: амплитудную и фазовую [2].

Амплитудная составляющая (рис. 1) представляет собой интенсивность сигнала, который отразился от поверхности. Она пропорциональна количеству энергии, возвращенной радаром, и зависит от свойств поверхности, таких как:

- тип поверхности: гладкие поверхности (вода, асфальт) отражают больше энергии, чем шероховатые (лес, горы).

- влага: влажная почва отражает больше энергии, чем сухая.

- шероховатость: более шероховатая поверхность рассеивает сигнал в более широком диапазоне углов.

Амплитудная часть радарных данных обычно используется для создания черно-белых изображений, где яркость пикселя соответствует уровню отраженной энергии.

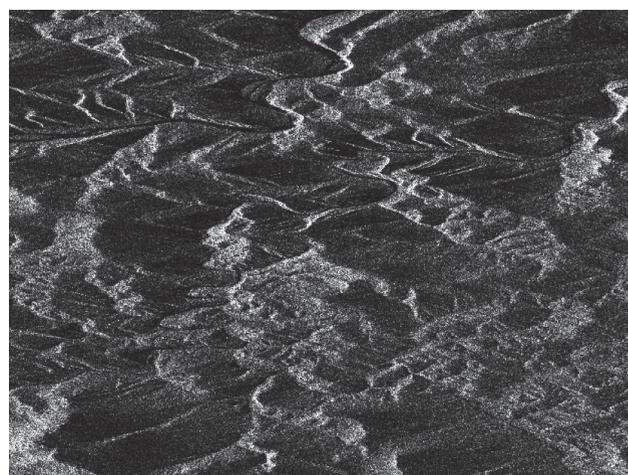


Рис. 1. Пример амплитудной составляющей радарного изображения

Фазовая составляющая (рис. 2) содержит информацию об изменении фазы радиоволны между излучением и приемом отраженного сигнала. Это изменение обусловлено разницей в расстоянии, которое проходит сигнал до поверхности и обратно к радару. Фазовая информация используется для:

- интерферометрии: сравнение фаз двух SAR-изображений, полученных с разных позиций, позволяет измерить высоту рельефа и составить цифровые модели местности (ЦММ);

— определения смещений: изменение фазы сигнала во времени может указывать на перемещения поверхности, например, вызванные землетрясениями, оползнями или движением ледников.



Рис. 2. Пример фазовой составляющей радарного изображения

Таким образом, амплитудная и фазовая составляющие SAR-данных дополняют друг друга, предоставляя полную картину о характеристиках поверхности Земли.

Рассмотрим методы обработки различных составляющих спутниковых радарных данных подробнее.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ АМПЛИТУДНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ РАДАРНЫХ ДАННЫХ

Для простого и быстрого определения изменений на поверхности Земли можно использовать амплитудную часть радарных изображений. Одним из алгоритмов, позволяющих определять изменения на основе таких данных, является алгоритм REACTIV [3]. Он преобразует данные из серии радарных снимков в понятную визуализацию изменений земной поверхности. При этом используются спутниковые изображения с разной поляризацией — VV и VH. Рисунки 3–4 демонстрируют примеры работы алгоритма:

— яркость цвета показывает интенсивность изменений: чем ярче цвет, тем сильнее изменения;

— оттенок цвета указывает на период времени, в течение которого произошли изменения.

Алгоритм работает на облачной платформе Google Earth Engine (GEE), что делает его доступным и удобным в использовании:

— результаты обработки получают за считанные секунды;

— нет необходимости скачивать большой (несколько сотен Гбайт) данных. Обработка происходит непосредственно на платформе, без скачивания больших объемов исходных радарных изображений.

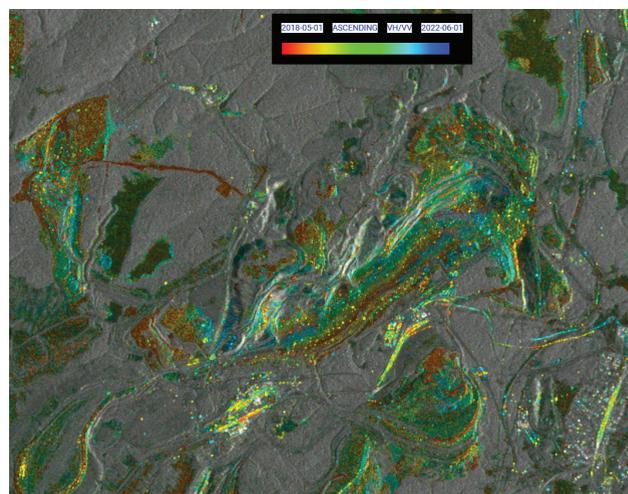


Рис. 3. Примеры работы алгоритма REACTIV, изменения на разрезе "Черниговский" с 2018 по 2022 гг.

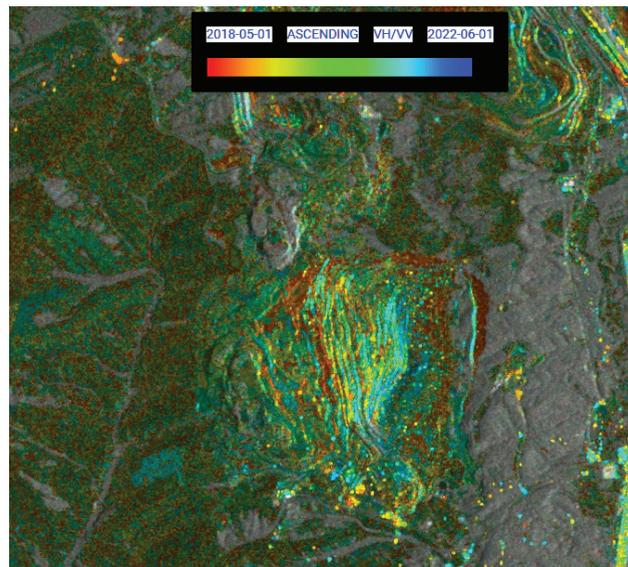


Рис. 4. Примеры работы алгоритма REACTIV, изменения на разрезе "Восточный" с 2018 по 2022 гг.

Кроме того, средствами GEE можно построить графики интенсивности произошедших изменений в интересующей точке (рис. 5).

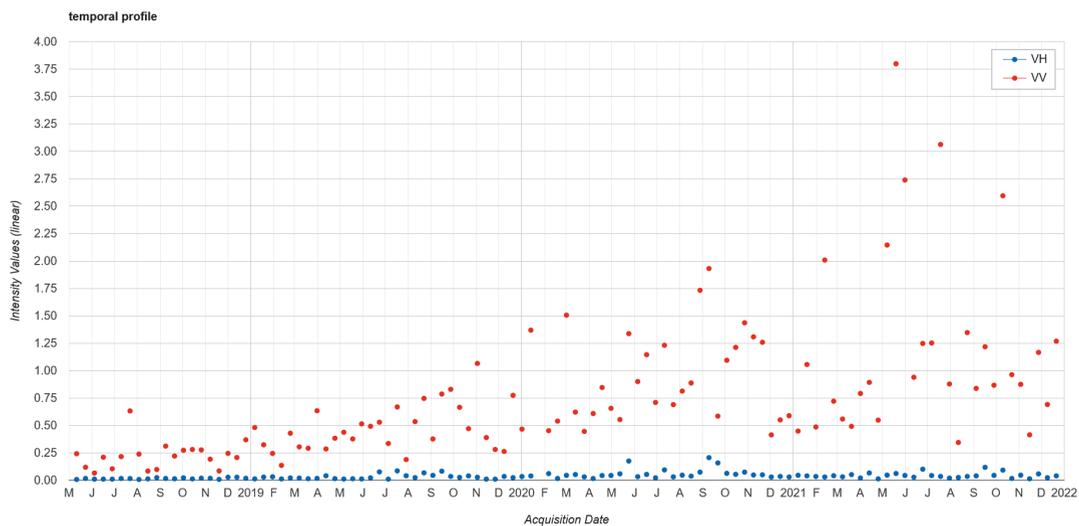


Рис. 5. Пример графика интенсивности изменений в восточной части разреза "Черниговский" с 2018 по 2022 год

Как видно из графика, основные изменения начали происходить в конце 2019 года, что, скорее всего, связано с началом интенсивных работ по добыче угля в этой части разреза.

Данный алгоритм позволяет обнаружить только место изменения и время, когда оно произошло. Для определения количественного значения изменения, например, скорости смещения земной поверхности, требуется произвести более трудоёмкую обработку фазовых составляющих радарных данных.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ФАЗОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ РАДАРНЫХ ДАННЫХ

Для обработки фазовых составляющих спутниковых радарных изображений обычно применяются методы радарной интерферометрии, которые отличаются количеством используемых изображений и получаемой информацией.

1. Дифференциальная интерферометрия (DinSAR).

Данные: используется пара снимков с небольшим временным интервалом (дни–недели).

Результат: карта вертикальных смещений земной поверхности, произошедших за этот период.

Применение: позволяет оценить краткосрочные деформации.

2. Метод SBaS (Small Baseline subset).

Данные: не менее трех снимков с небольшими базовыми линиями (расстояния между спутниками).

Результат: точечный векторный файл, представляющий карту средних скоростей смещений за длительный период (месяцы–годы).

Применение: Площадная оценка долговременной динамики деформаций.

3. Метод PS (Persistent Scatterers).

Данные: не менее тридцати снимков.

Результат: карта средних скоростей смещений для точечных объектов, являющихся стабильными отражателями (например, здания, мосты).

Применение: точечная оценка деформаций в городских условиях за длительный период.

В общих чертах, все три метода включают следующие этапы:

1. Корегистрация исходных изображений с использованием цифровой модели рельефа;

2. Формирование интерферограммы (сопоставление фаз волн от двух снимков);

3. Фильтрация и коррекция шума и ошибок;

4. Развёртка фазы для получения информации о смещениях;

5. Ортокоррекция и геокодирование полученных результатов.

Все эти методы позволяют получить значения вертикальных смещений в миллиметрах или их средних скоростей изменения в мм/год. При этом точность зависит от количества исходных изображений и составляет от нескольких сантиметров до нескольких миллиметров.

Выбор метода зависит от конкретной задачи, временного масштаба деформаций, доступности данных и необходимой точности.

Кемеровский филиал ФИЦ ИВТ с 2007 года занимается геодинамическим мониторингом горнопромышленных объектов Кузбасса с использованием радарных данных. Приведем пример такого анализа на реальных данных. В качестве объекта исследования была выбрана территория разрезов "Кедровский" и "Черниговский".

Для демонстрации работы метода дифференциальной интерферометрии мы использовали два радарных изображения с космического аппарата Sentinel-1A с датами 23.09.2015 и 05.10.2015 года. По результатам обработки этих снимков в программном комплексе SARscape была построена карта вертикальных смещений (рис. 6), на которой отображены деформации земной поверхности, произошедшие между двумя датами. Синим цветом отмечены просадки, красным — поднятия. Максимальные значения смещений составляют от $-0,038$ метра до $+0,028$ метра. Такой метод лучше подходит для определения краткосрочных изменений. Если увеличивать временной интервал между съемками, то итоговая карта смещений может оказаться сильно зашумленной. Особенно это актуально для территорий, где преобладает растительность.

Для определения долгосрочной динамики изменения земной поверхности мы использовали массив снимков за несколько месяцев. В качестве исходных данных на территорию объекта исследования использовалось 28 изображений за период с ноября 2016 года по октябрь 2017 года. Обработка производилась двумя методами — SbaS и PS — в программном комплексе SARscape. Дополнительно перед геокодированием результатов

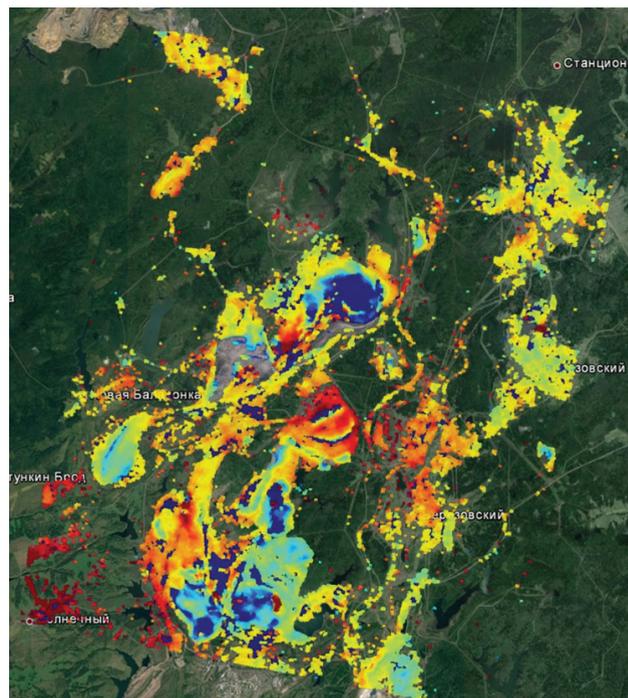


Рис. 6. Карта вертикальных смещений, построенная методом дифференциальной интерферометрии. Разрез "Кедровский" и разрез "Черниговский". 23.09.2015–05.09.2015

проводилась фильтрация точек от «зашумленных» точек на территориях с растительностью. В результате были получены две карты средних скоростей изменения вертикальных смещений (рис. 7–8).

Карта, полученная методом SbaS (рис. 7), содержит 57474 точки (при пороге когерентности 0,2) со значениями скоростей

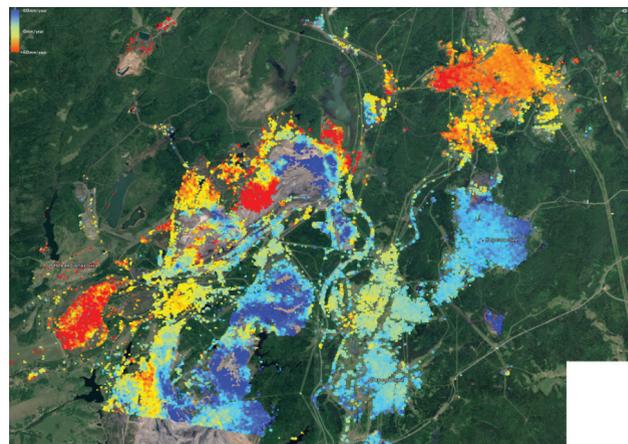


Рис. 7. Карта средних скоростей изменения вертикальных смещений. Метод SbaS. Разрез "Черниговский" и разрез "Кедровский". Ноябрь 2016 — октябрь 2017 гг.

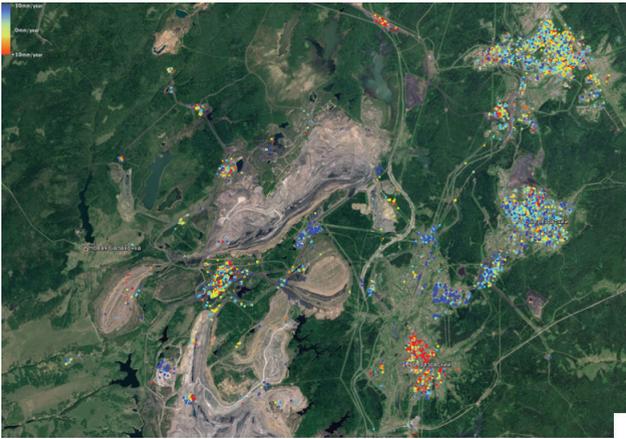


Рис. 8. Карта средних скоростей изменения вертикальных смещений. Метод PS. Разрез "Черниговский" и разрез "Кедровский". Ноябрь 2016 — октябрь 2017 гг.

смещений от -204 мм/год (точки синего цвета) до $+230$ мм/год (точки красного цвета). Деформации регистрируются по всей территории карьеров и отвалов, которые связаны с интенсивной добычей угля и складированием горной породы.

Карта, полученная методом PS (рис. 8), содержит 15030 точек (при пороге когерентности 0,75) со значениями скоростей смещений от -22 мм/год (точки синего цвета) до $+26$ мм/год (точки красного цвета). Отчетливо видно, что деформации регистрируются только на участках с жилой застройкой (территория г. Березовский) и на территориях технических сооружений около разреза (здания управления, автобаза и т.п.). Таким образом, данный метод не подходит для геодезического мониторинга мест угледобычи. Однако метод PS отлично показал себя в мониторинге смещений в городских территориях, в условиях жилой застройки, т.к. дома и прочие сооружения являются устойчивыми отражателями.

Для сравнения на рис. 9 представлены изменения на территориях разрезов "Черниговский" и "Кедровский" за тот же временной промежуток, рассчитанные с помощью алгоритма REACTIV на основе амплитудных составляющих радарных снимков. На рис. 9 видно, что интенсивные изменения также регистрируются на бортах карьера и на отвалах.

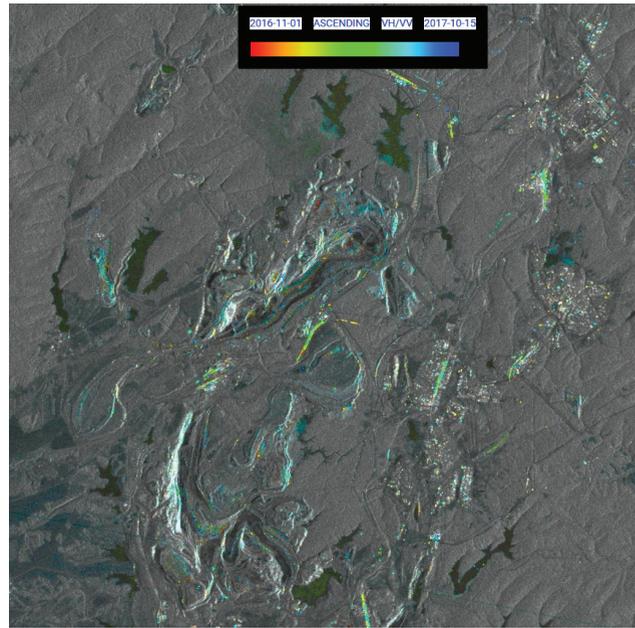


Рис. 9. Изменения на разрезах "Черниговский" и "Кедровский" с ноября 2016 по октябрь 2017 гг.; алгоритм «REACTIV»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетние исследования подтвердили эффективность использования спутниковых радарных изображений для оценки геодезических процессов. Методы обработки таких изображений являются особенно ценным инструментом в регионах с интенсивным техногенным воздействием.

Стоит отметить, что для оперативного определения местоположений, где произошли изменения на земной поверхности за длительный или короткий промежуток времени, подходят методы и алгоритмы обработки амплитудных составляющих радарных снимков. Однако для детальной оценки изменений и определения их количественных значений требуется более трудоёмкая и длительная обработка фазовых составляющих радарных данных с использованием методов радарной интерферометрии. В частности, для определения краткосрочных изменений подходит метод дифференциальной интерферометрии, для долгосрочных — SBaS и PS. Для ускорения обработки фазовых составляющих сотрудниками Кемеровского филиала ФИЦ ИВТ реализован технологический алгоритм на основе

Docker-конвейера, который автоматизирует и упрощает процесс работы с радарными данными любого космического аппарата радарного типа.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00148, <https://rscf.ru/project/23-17-00148/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Мусихин В. В. Мониторинг процессов оседаний земной поверхности в районах интенсивного недропользования на основе интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук.: 25.00.16. Пермь. 2012. 146 с.

Zhou X., Chang N., Li S. Review Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research // Sensors. Basel. 2009. № 9. С. 1876–1912.

Colin E., Nicolas J. Change Detection Based on the Coefficient of Variation in SAR Time-Series of Urban Areas // Remote Sensing. 2020. 23 p.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.94.52.002

UDC 528.88:528.8.044.2

© L. S. Mikov, V. P. Potapov, 2024

L. S. MIKOV

Junior Researcher

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Kemerovo
e-mail: mikov@ict.sbras.ru

V. P. POTAPOV

Doctor of Engineering Sciences, Professor

Leading Researcher

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Kemerovo
e-mail: vadimptpv@gmail.com

APPLIED ASPECTS OF SATELLITE RADAR DATA PROCESSING

This article focuses on the application of satellite radar data processing techniques for monitoring geodynamic processes in regions with intensive coal mining activity. The work examines both the phase and amplitude components of the radar signal. For analyzing phase changes, which are directly related to vertical displacements, processing methods such as differential interferometry, SBaS (Small Baseline subset), and PS (Persistent Scatterers) are described. Additionally, the REACTIV algorithm is presented, allowing for analysis of amplitude changes to assess variations in surface conditions. Examples of applying these methods to real data for monitoring mining facilities and evaluating the geodynamic situation in the Kuzbass region are demonstrated.

Keywords: GEODYNAMICS, GEODYNAMIC PROCESSES, RADAR DATA, RADAR INTERFEROMETRY, SATELLITE RADAR MONITORING, EARTH SURFACE DISPLACEMENTS, SMALL BASELINE SUBSET, PERSISTENT SCATTERER METHOD, DIFFERENTIAL INTERFEROMETRY.

REFERENCES

1. Musikhin V. V. Monitoring of surface subsidence processes in areas of intensive subsoil use based on interferometric processing of space radar sounding data: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences: 25.00.16. Perm, 2012. 146 p. [In Russ.]

2. Zhou X., Chang N., Li S. Review Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research // Sensors. Basel. 2009. No. 9. P. 1876–1912.

3. Colin E., Nicolas J. Change Detection Based on the Coefficient of Variation in SAR Time-Series of Urban Areas // Remote Sensing. 2020. 23 p.