

JAVAD HATAMIAFKOUEIEH

**METHODS FOR PROCESSING MULTI-TEMPORAL COMPOSITE SYNTHETIC
APERTURE RADAR DATA TO DETECT LAND SURFACE DISPLACEMENT**

2.3.1. System Analysis, Control and Information Processing, Statistics

Abstract of a Thesis

For the Degree of Ph.D. (Technical Sciences)

The dissertation is prepared in Engineering Academy of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba" (RUDN University)

Scientific Supervisor: Razoumny Yury Nikolaevich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Engineering Academy of RUDN University, Head of the Department of Mechanics and Control Processes at the Engineering Academy of RUDN University

Official Referees: Mikhailov Valentin Olegovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Head of Laboratory 502 "Comprehensive Geodynamic Interpretation of Ground and Satellite Data" Institute of Earth Physics named after O.Yu. Schmidt, Russian Academy of Sciences

Chimitdorzhiev Tumen Namzhilovich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Research Scientist, and Head of the Sector at the Federal State Budgetary Institution of Science, Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Galishnikova Vera Vladimirovna

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering

The defense of the dissertation will take place on December 26, 2024, at 12:00 during the meeting of the Dissertation Council PDS 2022.012 at the following address: 115419, Moscow, Ordzhonikidze Street, 3

The dissertation is in RUDN University Scientific Library: 117198, Moscow, Miklukho-Maklay str., 6
Announcement on the defense of dissertation and the abstract of dissertation are located at sites <http://vak2.ed.gov.ru/> и <https://www.rudn.ru/science/dissovet>

Abstract of the dissertation was sent 26.11.2024.

Scientific Secretary of Dissertation Council PDS 2022.012

Ph.D.

O.E. Samusenko

GENERAL DESCRIPTION OF SCIENTIFIC WORK

Relevance of Research

The use of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) is becoming increasingly important for studying natural and man-made processes. Synthetic aperture radars continuously capture the Earth's surface, regardless of the time of day or weather conditions. Repeated imaging of the same area is conducted every 6-12 days. Based on the obtained data, interferograms are created, allowing for the rapid monitoring of crustal displacements and modeling of natural and technological processes. However, there are still many unresolved issues in the field of radar data processing, some of which are addressed in this dissertation. This determines the relevance of the research topic.

Degree of Development of Research Topic

The technology has significantly evolved since its emergence in the 1950s, transforming into a reliable method for Earth observation (Massonnet and Feigl, 1998; Hanssen et al., 1999; Hanssen, 2001; Rosen et al., 2000; Rott, 2009; Mikhailov et al., 2014). The ability of InSAR to acquire phase information from ground objects and its relative resistance to weather conditions make it a valuable tool for round-the-clock, all-weather Earth observation, offering a cost-effective and efficient alternative to manual measurements (Liu et al., 2019; Mikhailov et al., 2023).

In the Russian Federation, the number of studies related to the application of InSAR interferometry has steadily increased in recent years. In addition to the Institute of Applied Geophysics (IFZ) of the Russian Academy of Sciences (RAS), theoretical and methodological aspects of this technology are being studied by scientists such as RAS academician V.G. Bondur and his team from the Institute of Aerocosmos, A.I. Zakharov, L.N. Zakharova, and their colleagues from the Fryazino branch of the V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Yu.A. Kashnikov and his co-authors (Perm National Research Polytechnic University), T.N. Chimitdorzhiev (Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of RAS), V.G. Kobernichenko, A.V. Sosnovsky (Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin), and A.V. Evtyushkin and his colleagues from the Baltic Federal University named after I.Kant.

The Differential InSAR (D-InSAR), an extension of InSAR (Bondur et al., 2022), has led to the development of dynamic InSAR measurement techniques (MT-InSAR), such as Persistent Scatterer InSAR (PS-InSAR), Small Baseline Subset InSAR (SBAS-InSAR), and Distributed Scatterer InSAR (DS-InSAR) (Massonnet and Feigl, 1998; Pepe and Calò, 2017; Ferretti et al., 2001; Zhu et al., 2018; Bondur et al., 2019). Each method has its own set of advantages and disadvantages, with SBAS-InSAR being distinguished by its ability to minimize atmospheric noise compared to PS-InSAR (Du et al., 2021; Feoktistov et al., 2017; Bondur et al., 2023). As the number of radar satellites launched increases, the availability of data for monitoring the Earth's crust activity also expands.

The use of the Small Baseline Subset (SBAS) method, compared to traditional InSAR methods, offers several advantages, including reduced dependence on weather conditions, leading to more accurate and reliable measurements of crustal dynamics. This approach enhances the coherence of measured signals by utilizing small baseline subsets, providing higher quality deformation maps with increased spatial resolution and temporal coverage, relative to classical methods. The expanded capabilities of SBAS InSAR are particularly valuable for monitoring small and localized deformation phenomena related to fault dynamics, fluid injection or extraction, and subsurface processes at oil and gas fields. Furthermore, SBAS InSAR offers flexibility in data processing and analysis, enabling the simultaneous use of multiple SAR datasets from different satellites and sensors. This multi-platform approach allows for the creation of precise surface dynamics maps.

To obtain surface deformation data using SBAS-InSAR, small subsets of baselines are selected based on spatial and temporal threshold values. Currently, there are three main selection methods.

First, setting only a temporal baseline threshold, as demonstrated in the study (Mohammadimanesh et al., 2019) for estimating surface deformations in the Yukon region, Canada. This method is typically used in areas with low coherence, such as mountainous and dense forest regions, effectively reducing temporal decorrelation.

Second, setting only a spatial baseline threshold, as shown in studies assessing deformations in Western Indonesia (Chaussard et al., 2013) and identifying deformation patterns in Tuscany (Kim et al., 2015). This approach effectively reduces topographic error impacts but requires high data coherence, making it more suitable for long-wavelength radar data.

Finally, setting both temporal and spatial baseline threshold values – the most used method with a wide range of applications. This approach has been used in various studies, including landslide monitoring (Zhao et al., 2012) and monitoring urban deformations in Shanghai, Shenzhen, and Wuhan (Tizzani et al., 2007; Chaussard et al., 2014).

In typical SBAS-InSAR applications, a fixed temporal baseline threshold is used to ensure coherence, but this can lead to decorrelation errors in scenarios with changing ground conditions, such as varying vegetation cover (Zhou et al., 2017; Mohammadimanesh et al., 2019). The proposed research is the first attempt to model the reliability of SBAS.

Objects of Study

Are seismically active areas of land surface displacement associated with oil and gas fields.

Subject of Study

Are methods for processing radar data using Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (D-InSAR) and its extensions, such as the Small Baseline Subset InSAR (SBAS-InSAR) method, for monitoring the dynamics of land surface displacement and improving measurement accuracy.

Purpose and Objectives of Study

The object of research is to develop methods for processing satellite multi-temporal composite radar data to determine the deformation of the Earth's crust, including in oil and gas field areas. To achieve this goal, the following scientific and technical tasks were addressed:

- **Develop and Apply SBAS-InSAR for Monitoring Land Displacement:** Utilize the SBAS-InSAR technique through the LiCSBAS toolbox and Comet Portal to monitor land displacement, leveraging Sentinel-1 satellite data for precise, time-sensitive measurements of ground movement.
- **Analyze and Interpret Displacement Patterns:** Conduct an in-depth analysis of SBAS-InSAR results to identify possible hazards and underlying causes of land displacement in oil and gas field areas, correlating observed surface changes with contributing factors.
- **Evaluate Methodology and Technical Constraints:** Assess the limitations and challenges of the SBAS-InSAR technique in capturing land displacement within oil and gas fields, considering issues like atmospheric interference, topographic effects, and data decorrelation.
- **Enhance SAR Data Accuracy for Improved Monitoring:** Implement methods to enhance the accuracy of SAR data in tracking land displacement, aiming to produce high-quality, reliable displacement maps and time series analyses.
- **Validate Methodology Against GPS Data for Reliability:** Assess the reliability and accuracy of displacement measurements by comparing InSAR results with GPS station data, validating the methods for monitoring ground dynamics and ensuring robust data interpretation.
- **Investigate Factors Affecting Land Displacement:** Analyze the factors influencing surface displacement within oil and gas fields, including oil extraction, groundwater pumping, and natural subsidence, to understand their combined effects on the Earth's crust dynamics and spatial displacement patterns.

Methodology and Research Methods

The work develops methods for assessing displacements on natural and technogenic objects using Sentinel-1 satellite data. The method of Small Baseline Subset (SBAS) is applied to study displacements based on a series of multi-temporal images. In addition to this method, LiCSAR – a specialized analysis system developed specifically for use with InSAR data is employed.

The research examines the main analytical methods, including the creation of interferograms, the application of time-series analysis techniques, such as image masking to remove noise and artifacts, the calculation of interferometric coherence, standard deviation of velocity, and other parameters important for determining crustal displacement models. Methods of spatiotemporal filtering are also used to enhance the clarity and accuracy of results, along with the decomposition of satellite data from ascending and descending orbits to identify vertical and horizontal displacement patterns.

Purpose of Study

The target of research is to provide a comprehensive understanding of the dynamic behavior of land surfaces within oil and gas fields, both geophysical monitoring practices and computational methodologies. Through the integration of advanced computational techniques, such as image processing and data analytics, this thesis seeks to enhance the efficiency and accuracy of multi-temporal monitoring, thereby improving the reliability of land surface displacement assessments.

Scientific Novelty of Research

- A new approach to semi-autonomous extraction of millimeter-level deformations from InSAR radar time series is proposed, aimed at providing a comprehensive understanding of the dynamic behavior of the Earth's surface within oil and gas field areas.
- A new structure for analyzing temporal changes in displacement patterns with high spatial resolution is introduced. The integration of detailed accuracy assessment methods, including comparison with GPS station data, enhances the reliability and justification of the developed methods.
- A method for Solving the ill-posed equation by CSBAS method addresses the ill-posed nature of the equation by introducing the minimum norm benchmark equation, which acts as a foundational constraint to stabilize the solution process.
- A method for measuring multidimensional deformation using time series of SAR images from both ascending and descending satellite orbits is proposed.
- A methodology for monitoring land surface displacement in areas with low coherence and varying degrees of spatiotemporal decorrelation is developed by tracking pixel displacement.

Practical Significance

The results obtained in this dissertation can be highly valuable for radar data processing, determining crustal deformations, and assessing the impact of oil and gas field development. In particular, the developed methods and software-algorithmic complex can be applied for:

- Identifying land subsidence, including in oil field areas.
 - Planning and maintaining infrastructure. The use of land subsidence data in infrastructure development projects enables decision-making during construction in high-risk zones and determining measures to protect existing infrastructure from potential damage caused by surface deformations.
 - Developing sustainable management strategies that balance resource extraction with minimal environmental impact. The research highlights the relationship between land surface deformation and oil and gas production, groundwater extraction, and natural compaction processes.
 - Environmental management, land resource management, and resource extraction industries.
- Several key practical aspects stand out from this research:
- Development of action plans for emergency situations related to ground movement.

Theoretical Significance of Research

results lie in their potential for use in scientific studies aimed at improving technologies for analyzing land surface movement in oil and gas fields, enhancing the accuracy and reliability of monitoring technologies.

Main Provisions Submitted for Defense

- A method for processing Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) data to determine crustal mobility in oil and gas field areas.
- A method for processing radar data using SBAS-InSAR (Small Baseline Subset InSAR) with the Small Baseline Subset (SBAS) technique, which enables the detection and measurement of land displacement over time.
- A methodology for processing InSAR time series using extended interferograms and coherence analysis.
- A software package that facilitates the processing of InSAR data, enabling the creation of high-quality displacement maps for various time periods.

Approbation of Research Results

The key concepts and findings of the research were discussed and presented at international scientific conferences:

- 13th International Conference AARSE 2022, "Space and Geospatial Technologies for the Africa We Want" (Kigali, Rwanda, 28.10.2022).

- International Conference on the Application of Remote Sensing and Space Sciences. Cham: Springer Nature, Switzerland (Hurgada, Egypt, 10.12.2022).

The dissertation topic has resulted in 9 publications, including 9 articles in indexed journals (Scopus, WoS).

Degree of Reliability of Results

The developed models are based on verified facts and data, consistent with published experimental and theoretical results on the dissertation topic.

Commonly accepted optimization and modeling methods based on theories that have proven their applicability were used.

The results of radar image processing were validated with ground-based data, based on GPS measurements. The quality and quantitative alignment of the author's results with those presented in independent sources on the topic have been confirmed.

BASIC CONTENT

In Chapter One, the literature review provides an extensive exploration of remote sensing techniques, with a particular emphasis on the revolutionary Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technology and its application in monitoring land displacement, particularly within oil and gas fields. The chapter commences with a detailed overview of remote sensing principles, elucidating the mechanisms behind Synthetic Aperture Radar (SAR) and its capability to capture high-resolution images of the Earth's surface. It delves into the technical aspects of SAR, including the emission of short pulses of radio frequency energy and the collection of backscattered signals to generate radar images with remarkable clarity and precision.

The discussion seamlessly transitions into the realm of InSAR technology, a game-changing innovation that leverages the phase differences between SAR images acquired from multiple passes over the same area to measure ground deformation with unprecedented accuracy. This section offers a comprehensive breakdown of InSAR principles, emphasizing the generation of interferograms and the pivotal role of interferometric coherence in assessing the reliability and quality of the phase measurements. By elucidating these fundamental concepts, the chapter lays a solid foundation for understanding the intricacies of InSAR technology and its transformative potential in monitoring land displacement. Furthermore, the chapter provides an in-depth examination of Small Baseline Subset (SBAS) InSAR, a specialized methodology tailored for the systematic monitoring of land displacement over time. It delves into the underlying principles of SBAS-InSAR, including the strategic selection of a small subset of radar images with minimal baseline differences to enhance the detection of subtle ground movements. This methodology, characterized by its sensitivity to gradual land subsidence, emerges as an indispensable tool for evaluating the impacts of oil and gas extraction activities on the Earth's surface.

Moreover, Chapter One conducts a critical synthesis of previous research endeavors that have harnessed InSAR technology for monitoring land displacement in oil and gas fields. It meticulously reviews the methodologies, findings, and limitations of these studies, offering valuable insights into the challenges and opportunities associated with the application of InSAR in this context. By contextualizing the current study within the broader research landscape, the chapter identifies gaps and opportunities for further exploration, paving the way for a deeper understanding of the complexities inherent in land displacement dynamics within oil and gas fields.

The chapter concludes by critically discussing the limitations and challenges of SBAS-InSAR technology, addressing issues such as temporal and spatial resolution constraints, coherence loss, and data processing complexities. By providing a comprehensive evaluation of the strengths and weaknesses of InSAR technology, the literature review establishes a robust framework for the subsequent empirical investigation conducted in the following chapters of the thesis.

In Chapter Two, the methodology employed in the study is meticulously delineated, providing a comprehensive roadmap for conducting the research effectively. The chapter commences with a thorough description of the study area, focusing on the oil and gas fields situated in Kern County, California. This geographical region holds significant importance due to its prominence in oil extraction activities and its susceptibility to land displacement phenomena. To provide a contextual backdrop, the chapter offers an introduction to the broader San Joaquin Valley (SJV) region, within which Kern County is located. Subsequently, detailed overviews of each specific oil field within Kern County are provided, including North Belridge, South Belridge, Midway-Sunset, Lost Hills, and Elk Hills. These overviews encompass not only the geographical features but also the geological setting, geochemical characteristics, and hydrology of each oil field, offering essential background information crucial for understanding the dynamics of land displacement.

Furthermore, Chapter Two elaborates on the data sources utilized in the study to capture and analyze land displacement patterns. A pivotal component of this methodology is the acquisition of Sentinel-1 satellite data, renowned for its high-resolution imaging capabilities and suitability for monitoring land surface changes. The processing of this satellite data is conducted through the Comet Portal platform, which facilitates the generation of interferograms and the extraction of relevant displacement information. Additionally, the chapter discusses the integration of ground-based measurements, including field data collected through field surveys and GPS data obtained from a network of monitoring stations strategically positioned across the study area (Figure 1). These ground-based measurements serve as crucial validation tools, enhancing the accuracy and reliability of the satellite-derived data.

The methodology section further delves into the utilization of advanced InSAR techniques, notably the Small Baseline Subset (SBAS) InSAR method, which serves as the primary approach for monitoring land displacement over time. This technique involves the systematic processing of radar images acquired over multiple time intervals to detect subtle ground movements with high precision. Complementing this method is the application of LiCSAR, a specialized processing system designed specifically for InSAR data analysis. The chapter elucidates the intricate architecture and processing chain of LiCSAR, providing insights into the technical workflow employed to analyze and interpret InSAR data effectively.

Moreover, Chapter Two expounds on the processing techniques facilitated by the Licsbas toolbox, which enables the decomposition of ascending and descending satellite data to identify vertical and horizontal displacement patterns accurately. This section highlights the technical nuances involved in processing and analyzing InSAR data, underscoring the meticulous methodology adopted to ensure the reliability and validity of the study findings.

Thus, the third chapter presents a thorough and systematic methodology for studying crustal dynamics in oil and gas fields, encompassing the identification of the study area, methods of data collection and processing, and the application of advanced InSAR techniques. By providing a comprehensive methodological foundation, the chapter lays a solid groundwork for the subsequent empirical research.

This section offers a full overview of the data sources used in the study, including satellite imagery, ground-based measurements, and geological models. The section examines the properties and limitations of each data source, as well as potential sources of error and uncertainty. It also includes a brief overview of the methods for data processing and analysis that will be employed to integrate and interpret these data sources.

The primary data source for this research is the Sentinel-1 satellite. The SAR data were obtained in interferometric wide-swath mode, which provides a bandwidth of up to 400 km and a spatial resolution of 5 x 20 meters. Data was collected between 2014 and 2023 and processed into interferograms for further analysis. Raw SAR data was processed using the Coherent Optical Multi-Look Processing Exploiting SAR data (COMET) portal, a web-based platform that provides users with an easy-to-use interface for processing Sentinel-1 data. The COMET Portal has several advantages for SAR data processing. First, being a web-based platform, it is accessible from any location with an internet connection. Second, the platform features a user-friendly interface, making it easier for non-specialists to process and analyze SAR data. Third, the platform offers a range of pre- and post-processing capabilities, reducing the need for additional software and hardware. Finally, the platform is developed and maintained by a team of experts, ensuring the relevance and reliability of the processing algorithms.

The Small Baseline Subset (SBAS) approach is a widely used InSAR time-series technique for measuring and monitoring land subsidence and deformation over large areas. The SBAS approach is based on selecting a subset of interferograms with small temporal baselines, which helps to minimize

the atmospheric and temporal decorrelation effects in InSAR analysis (Figure 1). This approach involves processing multiple radar images that are taken over time, with a focus on those that are closely spaced in time. By using small temporal baselines, the SBAS method reduces the impact of atmospheric disturbances and other noise sources that can affect the accuracy of measurements. This allows for more precise detection of ground movement, making it particularly useful in applications such as monitoring land subsidence, environmental changes, and deformation caused by human activities, such as oil and gas extraction.

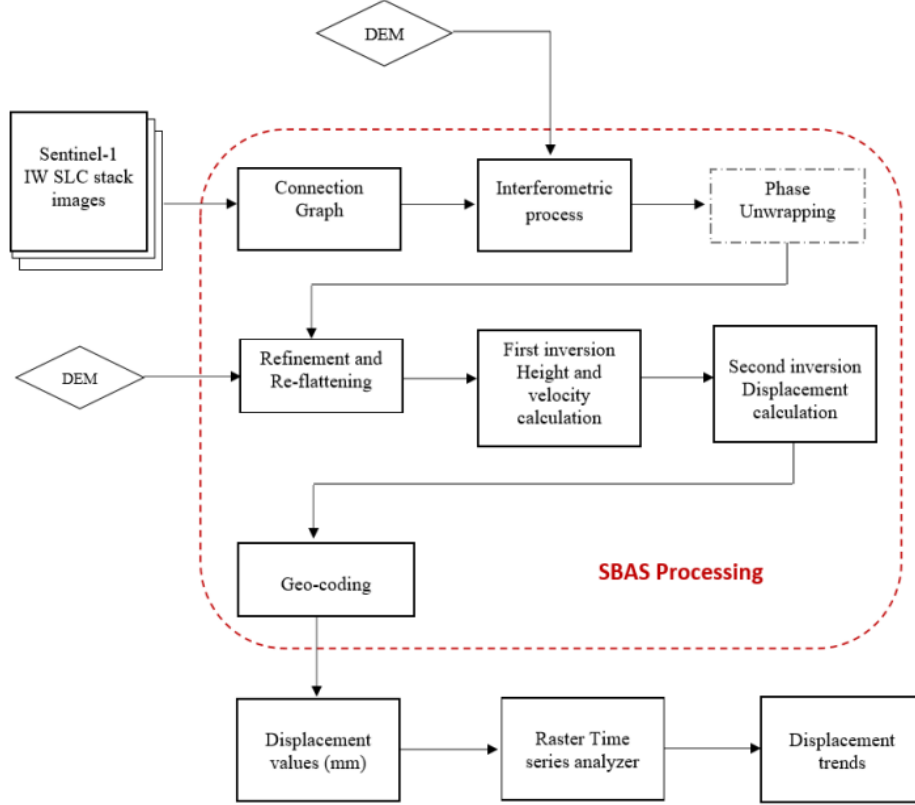


Figure 1. SBAS Typical workflow

The original $N+1$ SAR images covering a specific area generate M unwrapping interferograms by assuming that the Spatio-temporal baseline is within a particular range. The points where the average phase coherence is more than a certain threshold are high-coherence points. The unwrapping phase of a high-coherence point (x,r) of the i -th unwrapping interferogram (corresponding to two moments t_1 and t_2) is expressed as follows by Equation 1:

$$\Delta\varphi_i(x,r) = \varphi t_2(x,r) - \varphi t_1(x,r) \approx \frac{4\pi}{\lambda} (d(t_2,x,r) - d(t_1,x,r)) + \Delta\varphi_{top}^i + \Delta\varphi_{noise}^i, \quad (1)$$

where: $d(t_2,x,r)$ and $d(t_1,x,r)$ represent the cumulative displacement of the radar line of sight (LOS) at t_1 and t_2 relative to the starting time, $\Delta\varphi_{top}^i$ is the elevation residual phase caused by the DEM's inaccuracy; the noise phase such as the atmospheric phase screen and unwrapping error is usually expressed as $\Delta\varphi_{noise}^i$. After removing the residual elevation phase, the phase is solved to solve the velocity term. The parameters to be solved are as follows by Equation 2:

$$V^{IT} = [v_1 = (\varphi_1 - \varphi_0) / (t_1 - t_0), \dots, v^N = (\varphi^N - \varphi_{n-1}) / (t^N - t_{n-1})]. \quad (2)$$

The phase of the i -th unwrapping interferogram can be written as Equation 3:

$$\sum_{t_1, t_1+t_2, i} (t_k - t_{k-1}) V_k = \Delta\varphi_i. \quad (3)$$

The phases of all interferograms are expressed in the above form. The combined expressions are represented in the error Equation 4 as:

$$AV = \Delta\varphi. \quad (4)$$

where A is a matrix with dimensions of $M \times N$. If a single interferogram subset is formed, the least-

squares method can be used to solve the deformation rate. When two or more interferogram subsets are created, the singular value decomposition (SVD) method with minimum norm conditions needs to be introduced to obtain the deformation rate.

LiCSAR

The LiCSAR (Lincoln Centre for Autonomous Systems Research) system architecture is designed for the processing of large volumes of SAR data for deformation monitoring and mapping (Figure 2).

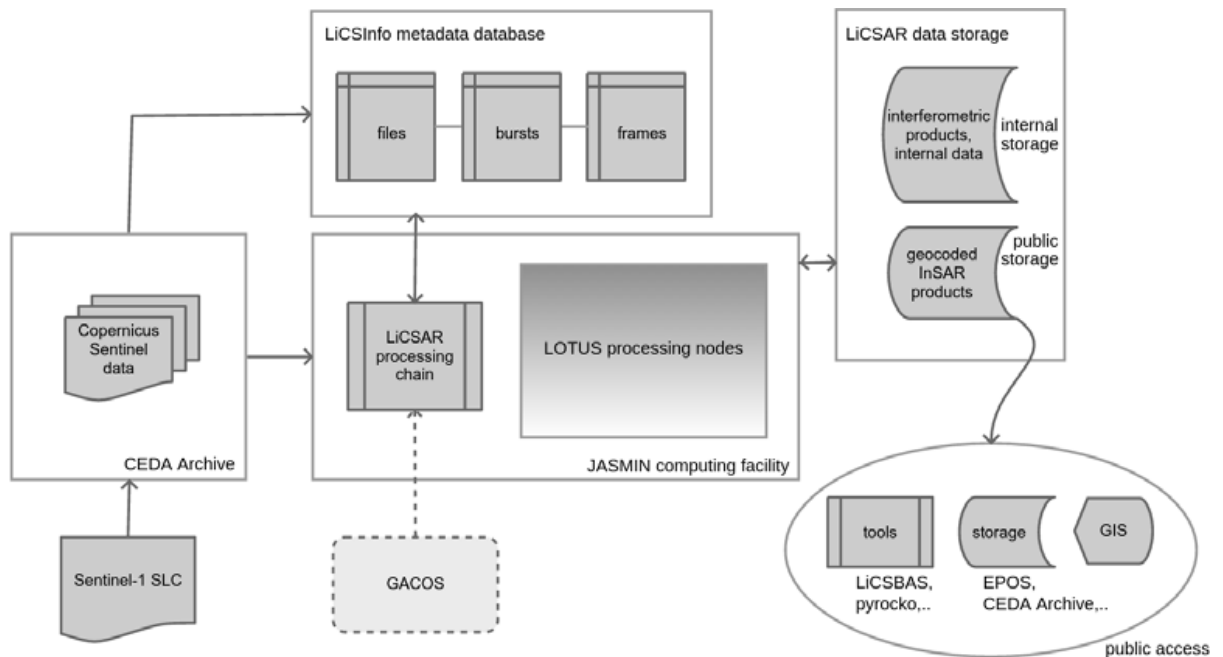


Figure 2. General overview of Looking into Continents from Space with Synthetic Aperture Radar (LiCSAR) system architecture

Interconnections between storage and computing structures leading the path from Sentinel-1 SLC acquisition to publicly accessible geocoded interferometric products.

Licsbas toolbox processing

The LICSBAS toolbox is an effective tool for the processing of Sentinel-1 data for ground displacement monitoring (Figure 3). The tool provides a complete workflow for processing the data and produces high-quality displacement maps and time series.

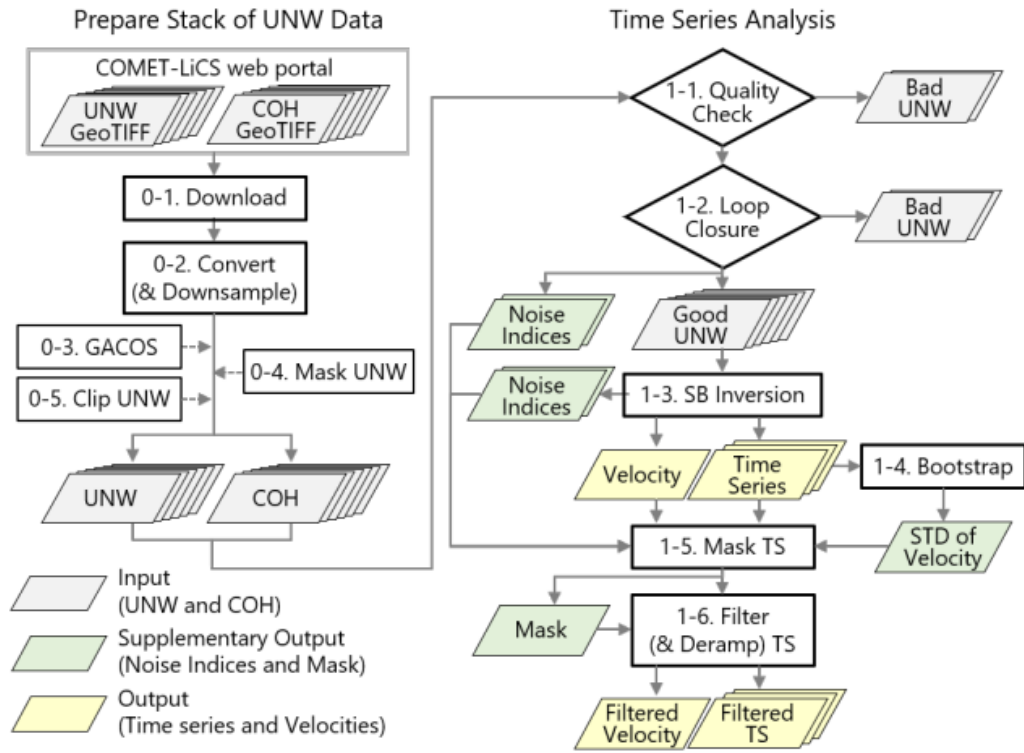


Figure 3. Workflow of LiCSBAS

Decomposition of ascending and descending data

The interferograms generated by the LiCS toolbox were decomposed into ascending and descending components to separate the vertical and horizontal components of deformation. This was achieved using the method proposed by, which involves fitting a plane to the interferometric phase data and extracting the vertical and horizontal components of deformation from the residuals. The resulting deformation maps were then analyzed to identify by Equation 5. In the decomposition process, the ascending and descending data were separately decomposed to extract the vertical and horizontal components of displacement. The vertical component of displacement is related to the subsidence or uplift of the ground, while the horizontal component of displacement is related to the lateral movement of the ground. The decomposition of the InSAR signal into vertical and horizontal components provides more detailed information about the nature of the deformation occurring in the study area

$$\begin{bmatrix} -\cos(\text{incASC}) & \sin(\text{incASC})\cos(\text{headingASC}) \\ -\cos(\text{incDESC}) & \sin(\text{incDESC})\cos(\text{headingDESC}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \text{MOVLOS_ASC} \\ \text{MOVLOS_DESC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{MOV_VERT} \\ \text{MOV_HORI} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Chapter 3 presents the results obtained from the empirical investigation conducted to analyze land displacement patterns in the oil and gas fields of Kern County, California. The chapter is structured to provide a detailed overview of the data processing steps, followed by the presentation and interpretation of the findings. The chapter begins with an introduction outlining the objectives of the results section and setting the context for the subsequent discussions. It then proceeds to discuss the data pre-processing steps undertaken to prepare the raw satellite data for analysis. This includes a detailed examination of the LiCSAR file structure, baseline connection network plot, and the generation of digital elevation models (DEMs), which are essential for accurate displacement measurements. Following data pre-processing, the chapter delves into the core analytical techniques employed, starting with interferogram generation in LiCSAR and phase unwrapping to extract the absolute phase values. Subsequently, time series analysis techniques are applied, including masking to remove noise and artifacts, computation of interferometric coherence, velocity standard deviation, and other parameters crucial for characterizing land displacement patterns over time. The chapter also discusses spatiotemporal filtering techniques utilized to enhance the clarity and accuracy of the results, as well as the decomposition of ascending and

descending satellite data to identify vertical and horizontal displacement patterns separately. Moreover, Chapter Three includes visualization of the results through various graphical representations and maps to provide a clearer understanding of the spatial distribution of land displacement across the study area. The validation and interpretation of the results are addressed in detail, including discussions on uncertainty estimation and the integration of findings from different oil and gas fields. The chapter concludes with a summary of the key findings, highlighting the main trends and patterns observed in land displacement across the various oil and gas fields in Kern County.

LiCSAR File Structure and Products Details

The LiCSAR outputs are stored in the ‘Products’ folder, with all generated interferometric pairs located in the ‘Interferograms’ folder. The name of each pair indicates the date of acquisition. Currently, three interferograms per epoch are being generated using the LiCSAR methodology, which involves logical decomposition of new acquisitions into pre-defined burst units and registration in the LiCS Info database. Images containing bursts that form a given frame are then extracted and merged into frame images that are registered towards a primary frame image set during initialization. The interferograms are formed by combining the new image with three previous ones, which is suitable for interpretation and for use in multitemporal InSAR processing methods based on small baselines strategy. Interferogram unwrapping is performed using the optimized SNAPHU approach. All LiCSAR products are multilocked to achieve a resolution of around 100×100 m per pixel.

While the general acquisition interval was primarily 24 days before the end of 2016, it reduced to 12 days after 2017 due to the start of Sentinel-1B operation. Each frame contains 240-430 interferograms (on average 350) derived from 70-140 acquisitions (on average 110), which includes three or four interferometric pairs for each acquisition with the preceding acquisitions (Lazecký et al. 2020). In total, ~ 12,000 interferograms and ~ 4,000 acquisitions were used, with spatial baselines almost always within 300 m.

In an ascending orbit (LiCSAR frame ID 137A_05534_131822), we processed an entire LiCSAR frame that covers the central zone of California State, USA. The observation period for this frame was from 31 January 2015 to 15 August 2021, which is approximately 6.6 years. The associated network consisted of 256 images and 1499 interferograms.

On the other hand, in a descending orbit (LiCSAR frame ID 144D_05501_131413), we also processed an entire LiCSAR frame that covers the same central zone of California State, USA. The observation period for this frame was from 08 November 2014 to 07 November 2021, which is approximately 7 years. The associated network consisted of 266 images and 954 interferograms.

The acquisition interval was primarily 24 days before 18 February 2017 and 12 days after this date due to the increased observational capacity from the availability of Sentinel-1B, even though all the data were acquired by Sentinel-1A. It is worth noting that the acquisition start dates are not consistent for all frames because of the non-uniform observation strategy of Sentinel-1.

Baseline connection network plot

A baseline plot is a useful visualization tool for understanding the SBAS method. It shows the temporal and spatial distribution of the interferograms used to generate the deformation time series. The horizontal axis of the plot represents time, and the vertical axis represents the perpendicular baseline between the two radar images used to generate each interferogram. A typical baseline plot for the SBAS method will have a series of lines or dots representing the interferograms used in the processing. The dots or lines will be color-coded based on the perpendicular baseline distance between the two radar images used to generate the interferogram. The longer the baseline distance, the larger the phase difference between the two images, and the more sensitive the interferogram will be to deformation.

The baseline plot can provide important insights into the quality and reliability of the deformation

time series generated using the SBAS method. It can help identify areas with poor coherence, which can result in inaccurate deformation measurements. It can also highlight areas with high deformation rates, which may require further investigation. The x-axis represents time (in days), while the y-axis represents the satellite's position in space (in meters). Each point on the plot corresponds to a satellite image, and each line represents an interferogram (Figure 4).

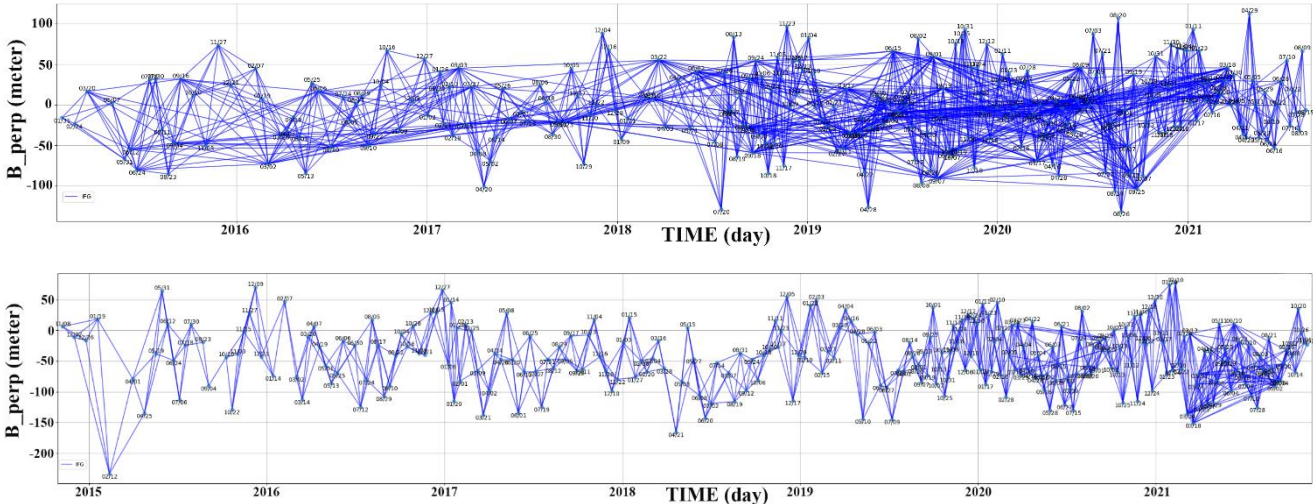


Figure 4. SBAS connection network for ascending (top) and descending (bottom) orbits

The noise indices quantify the level of noise in each pixel and include metrics such as coherence, standard deviation, and the number of available data points that are represented in Table 1. These indices are used to identify unreliable pixels in the time series data. Masking noisy pixels is crucial to ensure that the resulting displacement data is accurate and reliable. The presence of noisy pixels can significantly affect the displacement analysis and lead to erroneous interpretations.

Table 1 – Noise index Meaning

Noise index	Meaning
coh_avg	Average value of the interferometric coherence across the stack (0–1)
n_unw	Number of unwrapped data used in the time series calculation
Vstd	Standard deviation of the velocity (mm/yr) estimated in Step 1-4
maxTlen	Maximum time length of the connected network (years). The larger the value, the better the precision in the velocity estimate
n_gap	Number of gaps in the interferogram network and time series breaks
Stc	Spatiotemporal consistency (mm), which is the minimum root mean square (RMS) of the double differences of the time series in space and time between the pixel of interest and an adjacent pixel among all adjacent pixels
n_ifg_noloop	Number of interferograms with no loops that cannot be checked by the loop closure and possibly have unidentified unwrapping errors
n_loop_err	Number of the unclosed loops after the network refinement in Step 1-2
resid_rms	RMS of residuals in the small baseline (SB) inversion (mm)

In summary, Chapter Four serves as a comprehensive presentation and interpretation of the results obtained from the empirical investigation, providing valuable insights into the dynamics of land displacement induced by oil and gas extraction activities in the study area.

Light of sight (LOS) displacement

The proper visualization and interpretation of time series data are essential, but the large amount of associated data can hinder smooth visualization and intuitive interpretation. To obtain meaningful and accurate displacements, selecting an appropriate reference area is critical, as all measurements are relative rather than absolute. Unfortunately, most software does not allow for interactive examination and trial-and-error selection of the appropriate reference.

To address this issue, LiCSBAS provides an interactive time series viewer with two graphical user interfaces (Figure 5).

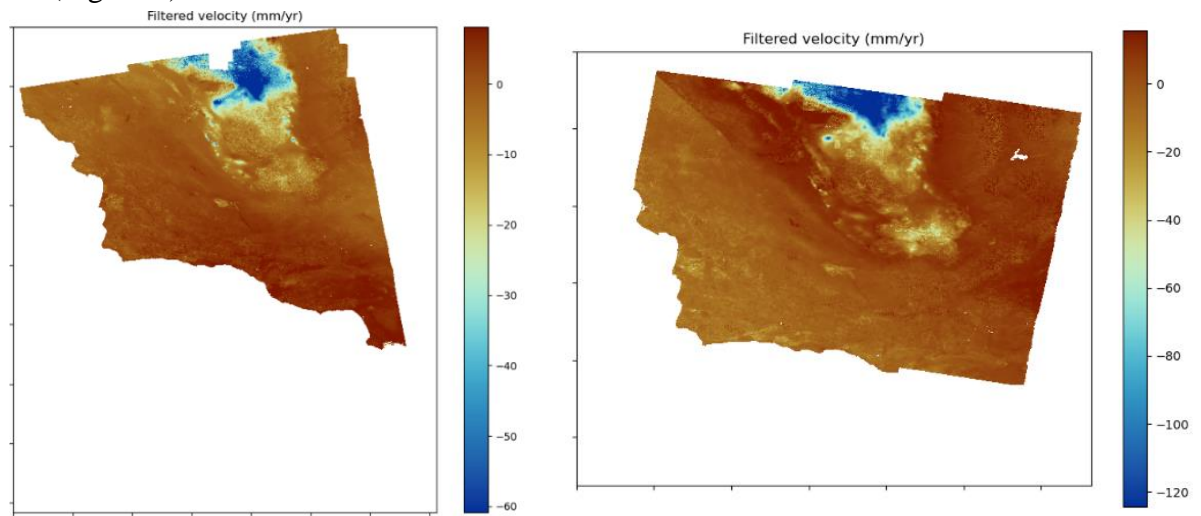


Figure 5. Displacement Velocity Map for the ascending (left) and descending (right) orbit scenes

Decomposition of Ascending and Descending Data

In InSAR, the process of decomposition of ascending and descending data refers to the separation of the interferometric phase (which contains the deformation signal) into two components: a component that is due to the topography (i.e., the shape of the Earth's surface) and a component that is due to the deformation of the surface. This decomposition is necessary because the interferometric phase can be affected by both topography and deformation, and separating these two components allows us to isolate the deformation signal. The decomposition of ascending and descending data in InSAR is typically done using a technique called the "baseline-dependent decomposition," which takes advantage of the fact that the interferometric phase has different characteristics depending on whether the radar is looking at the ground from the ascending or descending orbit. By comparing the interferometric phase from the ascending and descending orbits, the topographic and deformation components can be separated. In Licsbas InSAR, decomposition of ascending and descending data refers to separating the radar signal into two components based on the direction of the satellite's movement relative to the Earth's surface. Ascending data refers to measurements taken when the satellite is moving from south to north, while descending data refers to measurements taken when the satellite is moving from north to south.

Decomposition of ascending and descending data is typically used to separate out the different types of deformation that may be occurring on the Earth's surface. In general, ascending data is more sensitive to vertical deformation, while descending data is more sensitive to horizontal deformation. By analyzing the two components separately, researchers can better understand the different types of deformation that are occurring in each area. Results showing in two directions vertical and horizontal (east-west) direction (Figure 6).

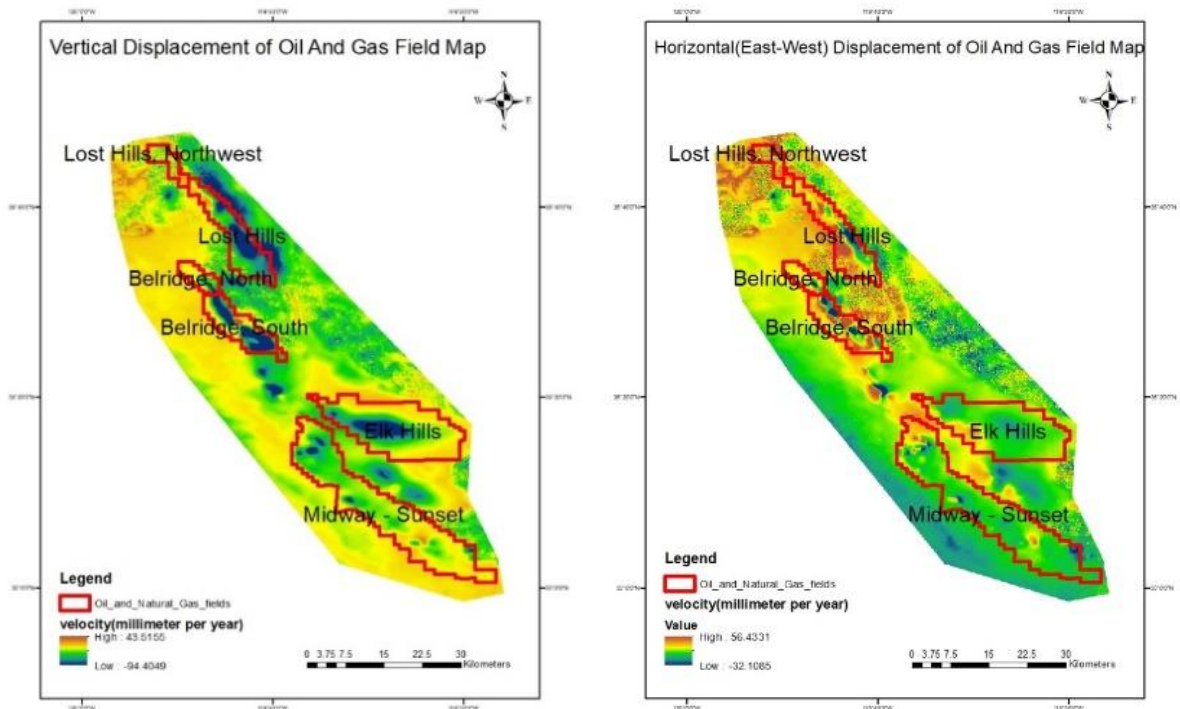
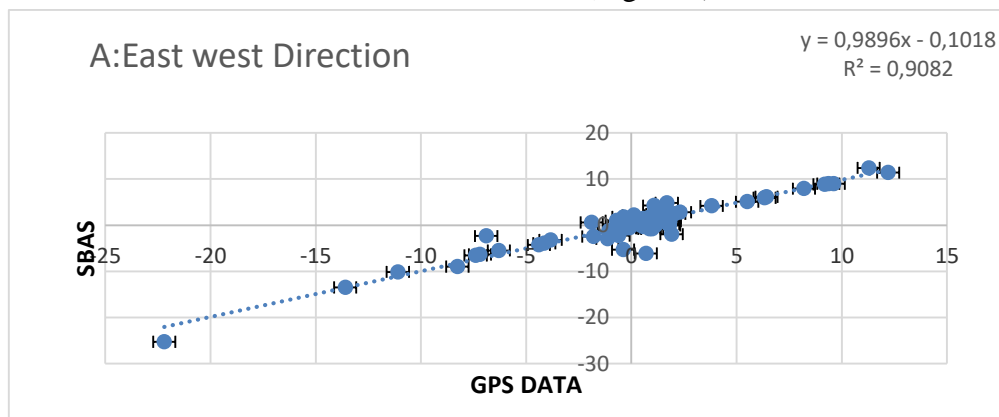


Figure 6. Map of vertical (left) and horizontal (right) displacement velocities for the oil and gas fields

Validation and Interpretation

In the context of InSAR and GPS data, the RMSE (Root Mean Square Error) and the coefficient of determination (R-squared) offer valuable insights into the agreement between the two data sets. For the east-west direction, an RMSE value of 1.894097 indicates that, on average, the difference between the SBAS InSAR and GPS measurements is about 1.89 units. This suggests a reasonably good agreement, with an R-squared value of 0.9, meaning that 90% of the variation in the GPS data can be explained by the SBAS InSAR data. Similarly, in the vertical direction, an RMSE of 2.4 indicates that the difference between the measurements is around 2.4 units on average, suggesting a reasonably good agreement. The R-squared value of 0.94 for the vertical direction means that 94% of the variation in the GPS data is explained by the SBAS InSAR data, reflecting a strong relationship between the two. These RMSE and R-squared values together provide a more complete picture of the data sets' correlation, although it's important to recognize that they can vary depending on the specific dataset and the conditions under which the measurements were collected (Figure 7).



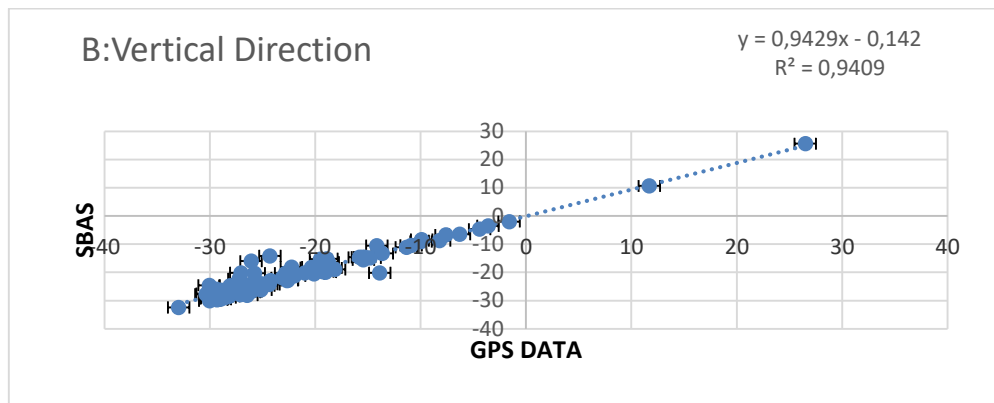


Figure 7. Chart of Registration Between SBAS InSAR and GPS, A) East-West Direction, B) Vertical Direction

MAIN RESULTS OF THE STUDY

- The SBAS-InSAR data analysis method has been described, including preprocessing, interferogram generation, and time series analysis.
- Several new tasks for precise and detailed ground displacement determination using the SBAS-InSAR baseline method have been formulated and solved, allowing for the use of data from different time periods with minimal loss of accuracy caused by atmospheric and topographic effects.
- InSAR data, including interferograms, coherence maps, and displacement maps, have been obtained for various study areas or time periods.
- A software-mathematical framework, implemented in Python, has been developed for processing and analyzing InSAR data. The system features an advanced graphical user interface (GUI), which facilitates data input/output, management of the InSAR data processing workflow, and graphical presentation of the analysis results.
- A statistical analysis method for radar InSAR data has been proposed, which determines the relationship between crustal movement rates and the rate of oil extraction.

PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION

1. Iman Khosravi, Yury Razoumny, **Javad Hatami Afkoeieh**, Seyed Kazem Alavipanah. Fully polarimetric synthetic aperture radar data classification using probabilistic and non-probabilistic kernel methods, *European Journal of Remote Sensing*, 54(1), pp.310-317_DOI <https://doi.org/10.1080/22797254.2021.1924081>
2. Iman Khosravi, Yury Razoumny, **Javad Hatami Afkoeieh**, Seyed Kazem Alavipanah. An ensemble method based on rotation calibrated least squares support vector machine for multi-source data classification, *International Journal of Image and Data Fusion* 12, no. 1 (2021): 48-63. _DOI <https://doi.org/10.1080/19479832.2020.1821101>
3. Sadegh Karimi-Rizvandi, Hamid Valipoori Goodarzi, Javad Hatami Afkoeieh. Il-Moon Chung, Ozgur Kisi, Sungwon Kim, Nguyen, Thi Thuy Linh Groundwater-potential mapping using a self-learning bayesian network model: A comparison among metaheuristic algorithms, *Water* 13, no. 5 (2021): 658. DOI <https://doi.org/10.3390/w13050658>
4. Sahar Amiri-Doumari, Ahmadreza Karimipour, Seyed Nader Nayebpour, **Javad Hatamiafkoeieh**. Integration of group method of data handling (GMDH) algorithm and population-based metaheuristic algorithms for spatial prediction of potential groundwater, *Environmental Earth Sciences* (2022) 81:48 <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10593-5>
5. Mohammad Hijji, Tzu-Chia Chen Muhammad Ayaz, AliS. Abosinnee, Iskandar Muda, Yury Razoumny and **Javad Hatamiafkoeieh**. Optimization of state of the art fuzzy-based machine learning techniques for surface water quality prediction in the coastal region, *Sustainability* 15, no. 8 (2023): 7016.<https://doi.org/10.3390/su15087016>
6. Khabat Khosravi, Fatemeh Rezaie; James R. Cooper; Zahra Kalantari; Soroush Abolfathi; **Javad Hatamiafkoeieh**. Soil water erosion susceptibility assessment using deep learning algorithms, *Journal of Hydrology*, 618, p.129229 [10.1016/j.jhydrol.2023.129229](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129229)
7. Solmaz Khazaei Moughani; Abdolbaset Osmani; Ebrahim Nohani; Saeed Khoshtinat; Tahere Jalilian; Zahra Askari; Salim Heddami; John P. Tiefenbacher; **Javad Hatamiafkoeieh**. Groundwater spring potential prediction using a deep-learning algorithm, *Acta Geophysica* (2023): 1-22.[10.1007/s11600-023-01053-0](https://doi.org/10.1007/s11600-023-01053-0)
8. Seyed Vahid Razavi-Termeh; **Javad Hatamiafkoeieh**; Abolghasem Sadeghi-Niaraki; Soo-Mi Choi; Khalifa M. Al-Kindi. A GIS-based multi-objective evolutionary algorithm for landslide susceptibility mapping, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* (2023): 1-26.[10.1007/s00477-023-02562-6](https://doi.org/10.1007/s00477-023-02562-6).
9. Yury Razoumny; **Javad Hatamiafkoeieh**; Sajjad Zeraat Peyma. InSAR Applications of Land Subsidence Over Oil Fields (Case Study Southeast of Republic of Tatarstan, Russia), In *International Conference of Remote Sensing and Space Sciences Applications*, pp. 153-159. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022.[10.1007/978-3-031-40447-4_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-40447-4_18).

DISSERTATION ABSTRACT

The dissertation discusses methods for processing multitemporal composite radar data for monitoring movement in dynamically dangerous situations with an emphasis on land displacement as a significant environmental issue linked to oil and gas extraction. This research explores the feasibility and effectiveness of the Small Baseline Subset (SBAS) InSAR technique for monitoring land displacement in five oil fields in Kern County, California (North Belridge, South Belridge, Midway-Sunset, Lost Hills, and Elk Hills). It addresses methodological challenges such as atmospheric interference and data decorrelation, while implementing strategies to improve SAR data accuracy for reliable, high-resolution, and time-sensitive measurements of ground movement. The study also introduces a semi-autonomous approach for extracting deformations and utilizes multi-dimensional analysis through ascending and descending SAR images, complemented by pixel offset tracking to monitor low-coherence areas. This integrated framework delivers comprehensive insights into the dynamics of land displacement.

Utilizing the SBAS-InSAR method through the LiCSBAS toolbox and Comet Portal, Sentinel-1 satellite data were analyzed to perform time-series analysis and examine the temporal evolution of land displacement. In the ascending orbit, observations spanned 6.6 years, with a network of 256 images and 1499 interferograms. In the descending orbit, similar analyses were conducted. The study provides a detailed understanding of surface displacement patterns, contributing factors, and potential hazards in oil and gas extraction regions.

ХАТАМИАФКУИЕХ ДЖАВАД

**МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МУЛЬТИВРЕМЕННЫХ КОМПОЗИТНЫХ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ДВИЖЕНИЯ
ЗЕМНОЙ КОРЫ**

Научная специальность

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в инженерной академии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН)

Научный руководитель: Разумный Юрий Николаевич
доктор технических наук, профессор, директор инженерной академии РУДН, заведующий кафедрой механики и процессов управления инженерной академии РУДН

Официальные оппоненты: Михайлов Валентин Олегович
доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией 502 «Комплексная геодинамическая интерпретация наземных и спутниковых данных» Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

Чимитдоржиев Тумэн Намжилович
доктор технических наук, доцент, профессор РАН, главный научный сотрудник, заведующий сектором оптико-микроволновой диагностики и обработки космической информации Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

Галишникова Вера Владимировна
доктор технических наук, доцент, проректор ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Защита диссертации состоится 26.12.2024 в 12:00 на заседании диссертационного совета ПДС 2022.012 по адресу: 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке РУДН по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Объявление о защите и автореферат диссертации размещены на сайтах <http://vak2.ed.gov.ru/> и <https://www.rudn.ru/science/dissovet>

Автореферат разослан 26.11.2024.

Ученый секретарь диссертационного совета ПДС 2022.012
кандидат технических наук

О.Е. Самусенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Использование интерферометрического датчика с синтезированной апертурой (InSAR) становится всё более востребованным методом для изучения природных и техногенных процессов. Радиолокаторы с синтезированной апертурой непрерывно снимают земную поверхность вне зависимости от времени суток и погодных условий. Повторные съёмки одной и той же территории проводятся через каждые 6-12 дней. На основе полученных данных создаются интерферограммы, позволяющие оперативно отслеживать смещения земной поверхности и моделировать природные и техногенные процессы. Однако на сегодняшний день остается еще много нерешённых задачи в области обработки радиолокационных данных, некоторые из которых рассматриваются в данной диссертации. Этим определяется актуальность темы исследования.

Степень разработанности темы исследования

Радиолокационная съёмка получила значительное развитие с момента своего появления в 1950-х гг., превратившись в надежный метод наблюдения Земли (Massonnet and Feigl, 1998; Hanssen et al., 1999; Hanssen, 2001; Rosen et al., 2000; Rott, 2009; Михайлов и др., 2014). Способность InSAR получать фазовую информацию от наземных объектов и относительная устойчивость к погодным условиям делают его ценным инструментом для круглосуточного, всепогодного наблюдения Земли, предлагая экономически эффективную и действенную альтернативу ручным измерениям (Liu et al., 2019; Михайлов и др., 2023).

В России количество исследований, связанных с применением РСА-интерферометрии, за последние годы неуклонно растёт. Помимо ИФЗ РАН, теоретическими и методологическими аспектами этой технологии занимаются такие учёные, как академик РАН В.Г. Бондур и его команда из НИИ «Аэрокосмос», А.И. Захаров, Л.Н. Захарова и их коллеги из Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ю.А. Кашников и его соавторы (Пермский национальный исследовательский политехнический университет), Т.Н. Чимитдоржиев (Институт физического материаловедения СО РАН), В.Г. Коберниченко, А.В. Сосновский (Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина), а также А.В. Евтюшкин и его коллеги из Балтийского федерального университета имени И. Канта и др.

Дифференциальный интерферометрический радар с синтезированной апертурой (D-InSAR), являющийся расширением InSAR (Бондур и др., 2022), привел к развитию методов динамических измерений InSAR (MT-InSAR), таких как InSAR с постоянными рассеивателями (сокращенно PS-InSAR), метод с малых базовых линий (SBAS-InSAR) и распределенных рассеивателей InSAR (DS-InSAR) (Massonnet and Feigl, 1998; Pepe and Calò, 2017; Ferretti et al., 2001; Zhu et al., 2018; Бондур и др., 2019). Каждый метод имеет свой набор преимуществ и недостатков, при этом метод SBAS-InSAR отличается своей способностью минимизировать атмосферные помехи по сравнению с методом PS-InSAR (Du et al., 2021; Феоктистов и др., 2017; Бондур и др., 2023). С увеличением числа запущенных радиолокационных спутников доступность данных для мониторинга активности земной поверхности также расширяется.

Использование метода малых базовых линий (SBAS) в отличие от традиционных методов InSAR, имеет ряд преимуществ, в том числе меньшую зависимость от погодных условий, что приводит к более точным и надежным измерениям динамики земной поверхности. Этот подход повышает когерентность измеряемых сигналов за счет использования малых базовых линий, что обеспечивает более высокое качество получаемых карт деформаций с увеличенными, относительно классических подходов, пространственным разрешением и временным охватом.

Расширенные возможности SBAS-InSAR особенно ценны для мониторинга небольших и локализованных деформационных явлений, связанных с динамикой пласта, закачкой или извлечением флюидов и подповерхностных процессов на нефтяных и газовых месторождениях. Кроме того, SBAS-InSAR обеспечивает гибкость в обработке и анализе данных, позволяя одновременно использовать несколько наборов данных SAR, полученных с различных спутников и датчиков. Такой мультиплатформенный подход позволяет создавать точные карты динамики поверхности.

Для получения данных о деформациях поверхности с помощью SBAS-InSAR, небольшие подмножества базовых линий выбираются на основе пространственных и временных пороговых значений. В настоящее время существует три основных метода отбора радиолокационных данных.

Во-первых, установка только временного порога базовой линии, как было показано в работе (Mohammadimanesh et al. 2019) по оценке деформаций поверхности земли на территории Юкон, Канада. Этот метод обычно используется в районах с низкой когерентностью, таких как горные и густые лесные массивы, позволяя эффективно уменьшить временную декорреляцию.

Во-вторых, установка только порога пространственной базовой линии, как показано в работах при оценке деформаций в западной Индонезии (Chaussard et al. 2013) и при выделении закономерностей деформации в Тасконе (Kim et al. 2015). Этот подход эффективно снижает влияние ошибок рельефа, но требует высокой когерентности самих данных, что делает его более подходящим для длинноволновых радиолокационных данных.

Наконец, установка пороговых значений временной и пространственной базовой линии – наиболее часто используемый метод, имеющий широкий спектр применения. Этот подход использован в различных исследованиях, включая работы по мониторингу оползней (Zhao et al. 2012) и мониторингу городских деформаций в Шанхае, Шэньчжэне и Ухане, соответственно (Tizzani et al. 2007, Chaussard et al. 2014).

В обычных приложениях SBAS-InSAR для обеспечения когерентности обычно используется фиксированный порог временной базовой линии для обеспечения когерентности, но это может привести к ошибкам декорреляции в случаях с изменяющимися наземными условиями, такими как переменный растительный покров (Zhou et al., 2017; Mohammadimanesh et al., 2019). Настоящее исследование является первой попыткой моделирования надежности SBAS.

Объектом исследования являются сейсмически активные участки земной поверхности, связанные с нефтегазовыми месторождениями.

Предмет исследования – методы обработки радиолокационных данных с использованием дифференциального интерферометрического радара с синтезированной апертурой (D-InSAR) и его расширений, таких как метод малых базовых линий (SBAS-InSAR), для мониторинга динамики земной поверхности и повышения точности измерений.

Цель работы заключается в разработке методов обработки спутниковых мультивременных композитных радиолокационных данных для определения деформаций земной поверхности, в том числе на участках нефтегазовых месторождений.

Для достижения поставленной цели решены следующие научно-технические задачи:

- Разработан комплексный метод обработки данных интерферометрического радара с синтезированной апертурой (InSAR), полученных со спутника Sentinel-1, включающий предварительную обработку данных, построение интерферограмм и методы анализа временных рядов.
- Предложен подход малых базовых линий (SBAS) для анализа смещения поверхности

земли и изучены возможности использования спутниковых данных Sentinel-1 для фиксации разновременных моделей смещения и понимания их пространственного распределения.

- Проведена оценка точности разработанных методов путем сравнения измерений смещения, полученных с помощью InSAR, с данными, полученными с использованием GPS-измерений. Дана оценка надежности и обоснованности методов, используемых для мониторинга динамики поверхности Земли.

- Исследованы факторы, влияющие на смещение поверхности земли на нефтегазовых месторождениях, включая добычу нефти, откачку грунтовых вод и естественные явления, такие как оседание. Проанализирована динамическая модель движения земной коры и ее корреляция с этими факторами.

Методология и методы исследования. В работе получили развитие методы обработки спутниковых данных Sentinel-1 для оценки смещений на природных и техногенных объектах. Для исследования смещения на основе серии мультитременных радиолокационных снимков применен метод малых базовых линий (SBAS). В дополнение к этому методу применяется LiCSAR – специализированная система анализа, разработанная специально для использования с данными InSAR. В работе рассматриваются основные аналитические методы: создание интерферограмм, методы анализа временных рядов, включая маскирование изображений для удаления шума и артефактов, вычисление интерферометрической когерентности, стандартного отклонения скорости и других параметров, важных для определения моделей смещения земной поверхности, методы пространственно-временной фильтрации, используемые для повышения четкости и точности результатов, а также декомпозиция спутниковых данных с восходящих и нисходящих орбит для выявления вертикальных и горизонтальных моделей смещения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Предложен новый подход к полуавтономному извлечению миллиметровых деформаций из временных рядов радара InSAR, направленный на всестороннее понимание динамического поведения поверхности земли в пределах участков нефтегазовых месторождений.

- Предложен новый способ анализа временных рядов оседаний в паттернах смещений с высоким пространственным разрешением. Интеграция подробных методов оценки точности, включая сравнение с данными GPS-станций, повышает надежность и обоснованность разработанных методов.

- Предложен метод решения задачи с нечеткой структурой с использованием подхода CSBAS, который устраняет нечеткость уравнения путем введения эталонного уравнения с минимальной нормой, действующее как фундаментальное ограничение для стабилизации процесса решения.

- Предложен метод измерения трех компонент вектора смещений с использованием снимков одного и того же участка поверхности с нисходящей и восходящей орбиты.

- Разработана методика мониторинга смещений земной поверхности в областях с низкой когерентностью и различной степенью пространственно-временной декогерентности путем отслеживания смещения пикселей.

Практическая значимость полученных результатов

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть востребованы для обработки радиолокационных данных при определении деформаций земной поверхности, в ходе оценки влияния разработки нефтегазовых месторождений. В частности, разработанные методы и программно-алгоритмический комплекс могут использоваться для:

- Выявления оседания земной поверхности, в том числе в области нефтяных месторождений.

- Использование данных об оседании земной поверхности в ходе градостроительного проектирования, что позволяет принимать решения в процессе строительства в зонах повышенного риска и определять меры для защиты существующей инфраструктуры от возможных повреждений, вызванных деформациями земной поверхности.

- Разработки устойчивых стратегий управления, которые сбалансируют добычу природных ресурсов с минимальным влиянием на окружающую среду. Результаты проведенных исследований позволили выявить взаимосвязь деформаций земной поверхности с добычей нефти и газа, откачкой подземных вод и естественными процессами уплотнения.

- Разработки планов действий при возникновении чрезвычайных ситуаций, связанных с подвижками земной поверхности.

Теоретическая значимость результатов исследования определяется возможностью их использования для научных исследований, направленных на совершенствование технологий анализа движения земной поверхности на нефтегазовых месторождениях, повышая точность и надежность мониторинговых технологий.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод обработки данных интерферометрического синтезированного апертурного радара (InSAR) для определения подвижек земной коры на участках нефтегазовых месторождений;

2. Метод обработки радиолокационных данных SBAS-InSAR с использованием метода малых базовых линий (SBAS), позволяющая обнаруживать и измерять смещение земли с течением времени;

3. Методика обработки временных рядов InSAR с использованием развернутых интерферограмм и когерентности;

4. Программный комплекс, обеспечивающий обработку данных InSAR, который облегчает создание высококачественных карт смещения на различные периоды времени

Апробация работы

Основные концепции и результаты исследований обсуждались и представлялись на следующих международных научных конференциях:

- 13-я Международная конференция AARSE2022 «Space and Geospatial Technologies for the Africa We Want» (г. Кигали, Руанда, 24-28 октября 2022 г.);

- 1-я международная конференция по применению дистанционного зондирования и космических наук «The 1st International Conference of Remote Sensing and Space Sciences Applications» (г. Хургада, Египет, 8-11 декабря 2022 г.).

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science.

Степень достоверности результатов

Разработанные методы основаны на фактах и проверенных данных, согласуются с опубликованными экспериментальными и теоретическими результатами по теме диссертации. Достоверность результатов связана с использованием общепринятых методов, подтвердивших свою применимость. Проведена валидация результатов обработки радиолокационных снимков с наземными данными, основанными на GPS-измерениях. Получено качественное и количественное совпадение результатов, полученных автором, с результатами, представленными в независимых источниках по этой теме.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе подробно рассматриваются методы дистанционного зондирования, особое внимание уделяется революционной технологии интерферометрического радара с синтезированной апертурой (InSAR) и ее применению для мониторинга смещения земной поверхности, в частности на нефтяных и газовых месторождениях. Глава начинается с подробного обзора принципов дистанционного зондирования, разъясняющего механизмы работы радара с синтезированной апертурой (SAR) и его способностью получать изображения земной поверхности с высоким разрешением. Рассматриваются технические аспекты SAR, включая излучение коротких импульсов радиочастотной энергии и сбор обратно рассеянных сигналов для создания радарных изображений с высокой детализацией и точностью.

Далее исследуется сфера технологии InSAR, которая использует разницу фаз между SAR-изображениями, полученными в результате нескольких проходов над одной и той же территорией, для измерения деформации поверхности с точностью до 2 мм для диапазона частот сантиметровых длин волн. В этом разделе дается полное описание принципов InSAR, особое внимание уделяется созданию интерферограмм и ключевой роли интерферометрической когерентности в оценке надежности и качества фазовых измерений. Раскрывая эти фундаментальные понятия, закладывается прочный фундамент для понимания тонкостей технологии InSAR и ее преобразующего потенциала в мониторинге смещения земель.

Также, в главе подробно рассматривается метод малых базовых линий (SBAS) – предназначенный для систематического мониторинга смещения земной поверхности за различные периоды времени. Анализируются основополагающие принципы SBAS-InSAR, в том числе стратегический выбор небольшого подмножества радарных изображений с минимальными различиями в исходных линиях для улучшения обнаружения малых смещений. Эта методология, характеризующаяся чувствительностью к постепенному оседанию земной поверхности, становится незаменимым инструментом для оценки воздействия деятельности по добыче нефти и газа на земную поверхность.

Кроме того, проводится критический синтез предыдущих исследований, в которых технология InSAR использовалась для мониторинга смещения земной поверхности на нефтегазовых месторождениях. В ней рассматриваются методологии, результаты и ограничения этих исследований, что позволяет получить ценное представление о проблемах и возможностях, связанных с применением InSAR в данном контексте. Выявляются возможности для дальнейшего изучения проблем мониторинга динамики земной поверхности на нефтегазовых месторождениях.

В конце раздела критически обсуждаются ограничения и проблемы технологии SBAS-InSAR, рассматриваются такие вопросы, как ограничения временного и пространственного разрешения, потери когерентности и сложности обработки данных. Давая всестороннюю оценку сильных и слабых сторон технологии InSAR, закладывается надежная основа для последующих эмпирических исследований, проводимых в следующих разделах диссертации.

Во второй главе тщательно описывается методология, использованная в исследовании, и дается исчерпывающая дорожная карта для эффективного проведения анализа. Раздел начинается с подробного описания района исследования, в котором находятся нефтегазовые месторождения, расположенные в округе Керн, штат Калифорния. Эти обзоры охватывают не только географические особенности, но и геологическую обстановку, геохимические характеристики и гидрологию каждого нефтяного месторождения, предоставляя важную справочную информацию, необходимую для понимания динамики смещения поверхности. Кроме того, подробно рассматриваются источники данных, использованные в исследовании для

фиксации и анализа закономерностей смещения земной поверхности. Важнейшим компонентом этой методологии является получение данных со спутника Sentinel-1, известного своими возможностями получения изображений высокого разрешения и пригодностью для мониторинга изменений поверхности земли. Обработка спутниковых данных осуществляется с помощью платформы Comet Portal, которая облегчает создание интерферограмм и извлечение необходимой информации о смещении поверхности. В главе рассматривается интеграция наземных измерений, включая данные, собранные в ходе полевых исследований, и данные с GPS приемников, расположенных по всей территории исследования (рисунок 1). Эти наземные измерения служат важнейшими инструментами контроля точности результатов. Далее в методологическом разделе рассматривается использование передовых методов InSAR, в частности метода малых базовых линий (SBAS), которые служат основным подходом для мониторинга динамики земной поверхности с течением времени. Этот метод предполагает систематическую обработку радиолокационных изображений, полученных за несколько временных интервалов, что позволяет с высокой точностью обнаружить едва заметные смещения. В дополнение к этому методу применяется LiCSAR - специализированная система анализа, разработанная специально для использования с данными InSAR. Раскрывается сложная архитектура и цепочка обработки LiCSAR, что дает представление о техническом процессе, используемом для эффективного анализа и интерпретации данных InSAR. Кроме того, во второй главе рассказывается о методах обработки, которые предоставляет инструментальный Licsbas, позволяющий разложить спутниковые данные с восходящих и нисходящих орбит для точного определения вертикальных и горизонтальных смещений. В этом разделе освещаются технические нюансы, связанные с обработкой и анализом данных InSAR, и подчеркивается тщательность методологии, принятой для обеспечения надежности и обоснованности результатов исследования.

Таким образом, во второй главе систематизирована методология исследования динамики земной поверхности на участках нефтегазовых месторождений, включающая в себя выделение района исследования, методы сбора и обработки данных, а также применение передовых методик InSAR. Предоставив всеобъемлющую методологическую базу, закладывается прочный фундамент для последующих эмпирических исследований.

Основным источником данных для данного исследования послужил спутник Sentinel-1. Данные SAR были получены в интерферометрическом широкополосном режиме, обеспечивающем ширину полосы до 400 км и пространственное разрешение 5 x 20 м. Данные были получены в период с 2014 по 2023 год и были обработаны в интерферограммы для дальнейшего анализа.

Сырые данные SAR были обработаны с помощью портала Coherent Optical Multi-look Processing Exploiting SAR data (COMET), который представляет собой веб-платформу, позволяющую пользователям простой в использовании интерфейс для обработки данных Sentinel-1. Comet Portal обладает целым рядом преимуществ для обработки данных SAR. Во-первых, это веб-платформа, а значит, доступ к ней возможен из любого места, где есть подключение к Интернету. Во-вторых, платформа обладает удобным интерфейсом, что облегчает обработку и анализ данных SAR для неспециалистов. В-третьих, предоставляется ряд возможностей предварительной и последующей обработки, что снижает потребность в дополнительном программном и аппаратном обеспечении. Наконец, это продукт разрабатывается и поддерживается командой экспертов, что обеспечивает актуальность и надежность алгоритмов обработки.

Одним из важных аспектов полевых данных является расположение скважин для добычи и

нагнетания нефти и газа, которые могут дать представление о геологических структурах и движении флюидов в недрах. Глубина скважин также имеет решающее значение, поскольку она влияет на количество и качество углеводородов, которые могут быть извлечены. Наземные измерения имеют значение для проверки методов дистанционного зондирования, обеспечивая независимые и высокоточные измерения деформации грунта, которые могут быть использованы для оценки точности методов дистанционного зондирования и предоставления ценной информации о процессах деформации. GPS является одним из наиболее широко используемых наземных методов для измерения динамики движения земной поверхности.

Метод малых базовых линий (SBAS) широко используется для измерения и мониторинга оседания и деформации земной поверхности на больших территориях. Метод SBAS основан на выборе подмножества интерферограмм с малыми временными базовыми линиями, что позволяет минимизировать атмосферные и временные эффекты декорреляции при анализе InSAR (рисунок 1).

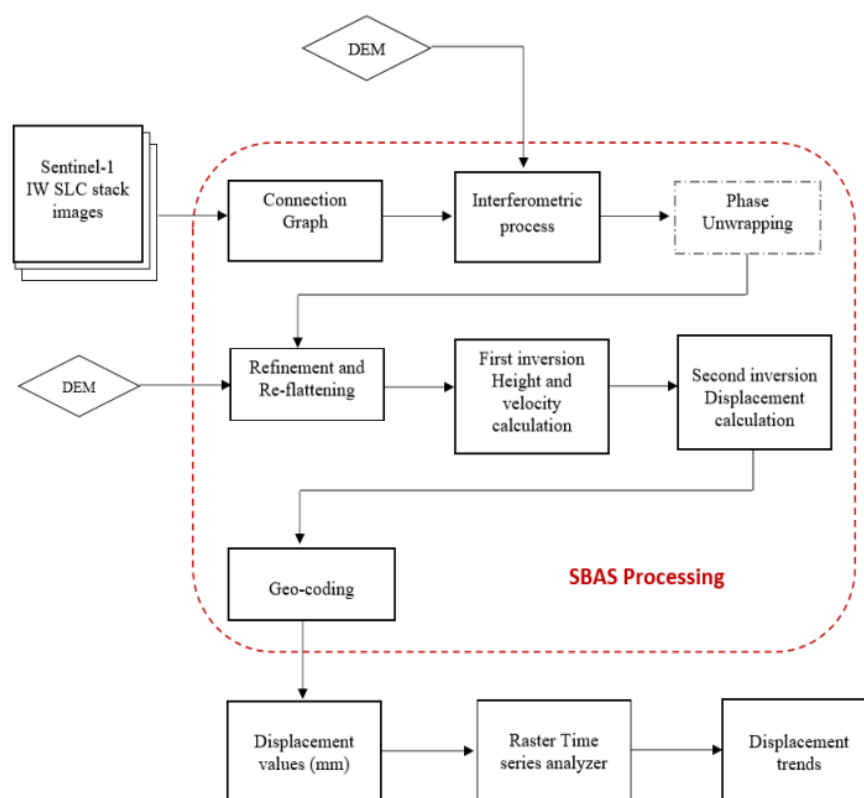


Рисунок 1. технологический процесс SBAS

Исходные $N+1$ изображений SAR, охватывающие определенную область, генерируют M распакованных интерферограмм, предполагая, что пространственно-временная базовая линия находится в определенном диапазоне. Точки, где средняя фазовая согласованность превышает определенный порог, считаются точками высокой согласованности. Распакованная фаза точки высокой согласованности (x, r) i -й распакованной интерферограммы (соответствующей моментам времени t_1 и t_2) выражается следующим образом:

$$\Delta\varphi_i(x, r) = \varphi_2(x, r) - \varphi_1(x, r) \approx (4\pi/\lambda) [d(t_2, x, r) - d(t_1, x, r)] + \Delta\varphi_{top}^i + \Delta\varphi_{noise}^i \quad (1)$$

где $d(t_2, x, r)$ и $d(t_1, x, r)$ представляют собой накопленное перемещение линии взгляда радара (LOS) в моменты времени t_1 и t_2 относительно начального времени $\Delta\varphi_{top}^i$ - это остаточная фаза высоты, вызванная неточностью цифровой модели местности (DEM); фазовый шум, такой как атмосферный фазовый экран и ошибка распаковки, обычно выражается как $\Delta\varphi_{noise}^i$. После удаления остаточной фазы высоты последняя используется для нахождения скорости. Скорость в данном случае определяется по формуле 2:

$$v^T = [v_1 = (\varphi_1 - \varphi_0) / (t_1 - t_0), \dots, v^N = (\varphi^N - \varphi_{n-1}) / (t^N - t_{n-1})] \quad (2)$$

Фаза i -й развертки интерферограммы может быть записана следующей формулой:

$$\sum_{t^1, i+1, t^2, i} (t_k - t_{k-1}) V_k = \Delta\varphi_i \quad (3)$$

Фазы всех интерферограмм выражены в вышеприведенной форме. Объединенные выражения представлены в уравнении:

$$AV = \Delta\varphi \quad (4)$$

где A – матрица размером $M \times N$. Если формируется единственное подмножество интерферограмм, то для решения скорости деформации можно использовать метод наименьших квадратов. Когда создаются два или более подмножества интерферограмм, необходимо ввести метод сингулярного разложения (SVD) с условиями минимальной нормы, чтобы получить скорость деформации.

Архитектура системы центра исследований автономных систем им. Линкольна (англ. Lincoln Centre for Autonomous Systems Research – LiCSAR) предназначена для обработки больших объемов данных SAR для мониторинга и картографирования деформаций, представлена на рисунке 2.

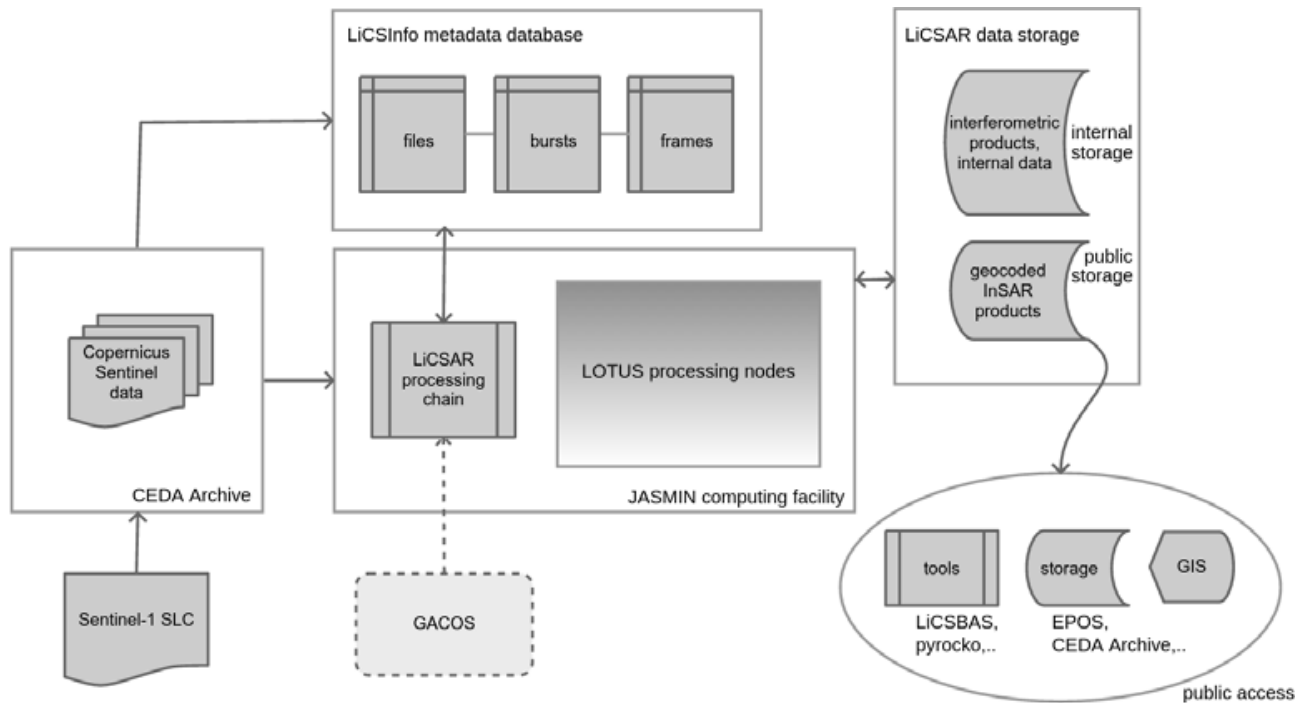


Рисунок 2. Общий обзор архитектуры системы "Взгляд на континенты из космоса с помощью радара с синтезированной апертурой" (LiCSAR)

Инструментарий Lisbas предоставляет пользовательский интерфейс для обработки данных InSAR Sentinel-1 с использованием алгоритма SBAS. Этот инструмент предоставляет полный рабочий процесс для обработки данных и создает карты перемещений и временные ряды высокого качества. Рабочий процесс LiCSBAS представлен на рисунке 3.

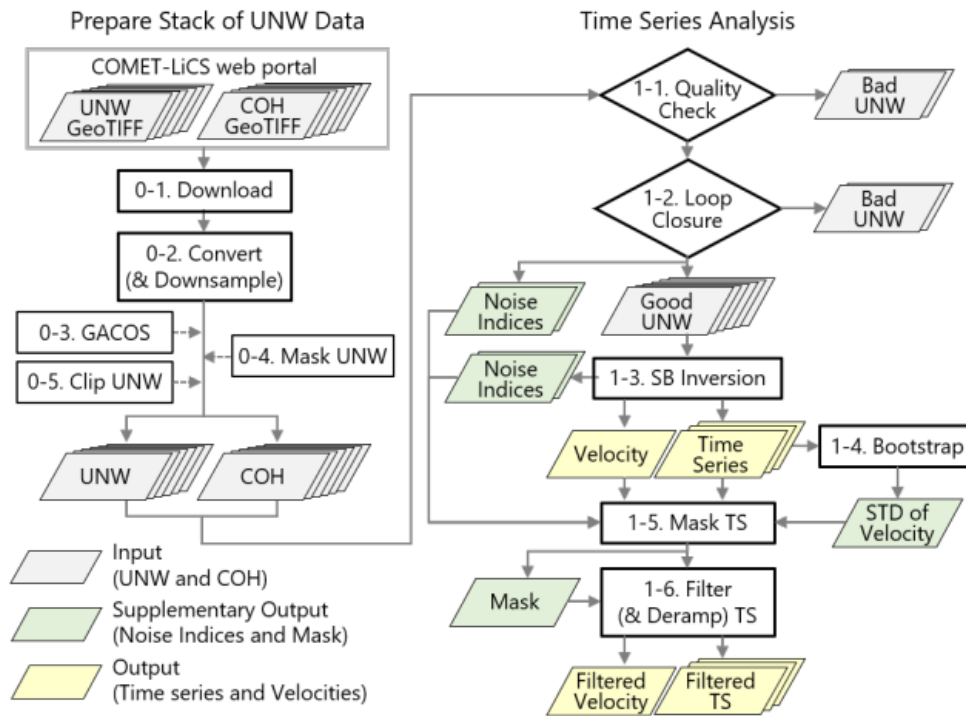


Рисунок 3 Рабочий процесс LiCSBAS

Интерферограммы, полученные с помощью инструментария LiCS, были разложены на восходящие и нисходящие компоненты для разделения вертикальной и горизонтальной составляющих деформации. Для этого использовался метод, предложенный в работе, который заключается в подгонке плоскости к интерферометрическим фазовым данным и выделении вертикальной и горизонтальной компонент деформации из остатков.

В процессе декомпозиции данные восходящих и нисходящих орбит были разделены для выделения вертикальной и горизонтальной компонент смещения. Вертикальная составляющая смещения связана с оседанием или поднятием грунта, а горизонтальная составляющая смещения связана с боковым движением грунта. Разложение сигнала InSAR на вертикальную и горизонтальную составляющие (формула 5) дает более подробную информацию о характере деформации, происходящей на исследуемой территории.

$$\begin{bmatrix} -\cos(\text{incASC}) & \sin(\text{incASC})\cos(\text{headingASC}) \\ -\cos(\text{incDESC}) & \sin(\text{incDESC})\cos(\text{headingDESC}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \text{MOVLOS_ASC} \\ \text{MOVLOS_DESC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{MOV_VERT} \\ \text{MOV_HORI} \end{bmatrix} \quad (5)$$

В третьей главе представлены результаты, полученные в ходе эмпирического исследования, проведенного для анализа моделей перемещения земель на нефтегазовых месторождениях округа Керн, штат Калифорния. Глава построена таким образом, чтобы дать подробный обзор этапов обработки данных, а затем представить и интерпретировать полученные результаты. Глава начинается с введения, в котором излагаются цели раздела результатов и задается контекст для последующих обсуждений. Далее в ней обсуждаются этапы предварительной обработки данных, предпринятые для подготовки исходных спутниковых данных к анализу. Сюда входит детальное изучение структуры файлов LiCSAR, построение сети базовых соединений и создание цифровых моделей рельефа (ЦМР), которые необходимы для точных измерений смещений. После предварительной обработки данных в главе рассматриваются основные аналитические методы, начиная с создания интерферограмм в LiCSAR и разворачивания фазы для извлечения абсолютных значений фазы. Затем применяются методы анализа временных рядов, включая маскирование для удаления шума и артефактов, вычисление интерферометрической когерентности, стандартного отклонения скорости и других

параметров, важных для определения моделей смещения земной поверхности. В главе также обсуждаются методы пространственно-временной фильтрации, используемые для повышения четкости и точности результатов, а также декомпозиция спутниковых данных с восходящей и нисходящей орбиты для выявления вертикальных и горизонтальных моделей смещения отдельно. Кроме того, третья глава включает визуализацию результатов для более четкого понимания пространственного распределения смещения земель на исследуемой территории. Подробно рассматриваются вопросы проверки и интерпретации результатов. В конце раздела приводятся основные выводы, подчеркиваются основные тенденции и закономерности, наблюдаемые в смещениях земной поверхности на различных нефтегазовых месторождениях в округе Керн.

По методике LiCSAR были сгенерированы по три интерферограммы за эпоху, что предполагает логическую декомпозицию новых съемок на заранее определенные единицы всплесков и регистрацию в базе данных LiCSInfo. Интерферограммы формируются путем совмещения нового изображения с тремя предыдущими, что удобно для интерпретации и использования в методах многовременной обработки InSAR, основанных на стратегии малых базовых линий. Развертка интерферограмм выполняется с использованием оптимизированного подхода SNAPHU. Все продукты LiCSAR многократно обработаны для достижения разрешения около 100×100 м на пиксель.

Если до конца 2016 года общий интервал съемки составлял преимущественно 24 дня, то после 2017 года он сократился до 12 дней в связи с началом работы Sentinel-1B. Каждый снимок содержит 240–430 интерферограмм (в среднем 350), полученных в результате 70–140 съемок (в среднем 110), что включает три или четыре интерферометрические пары для каждой съемки с предыдущими съемками (Lazecký et al. 2020). Всего было использовано $\sim 12\,000$ интерферограмм и $\sim 4\,000$ поглощений, при этом пространственные базовые линии почти всегда находились в пределах 300 м.

На восходящей орбите (идентификатор снимка LiCSAR 137A_05534_131822) был обработан весь снимок LiCSAR, охватывающий центральную зону штата Калифорния, США (рисунок 9). Период наблюдений для этого снимка составил с 31 января 2015 года по 15 августа 2021 года, то есть примерно 6,6 лет. Соответствующая сеть состояла из 256 изображений и 1499 интерферограмм.

С другой стороны, на нисходящей орбите (идентификатор снимка LiCSAR 144D_05501_131413) также был обработан весь снимок LiCSAR, охватывающий ту же центральную зону штата Калифорния, США (рисунок 5). Период наблюдения для этого снимка – с 08 ноября 2014 года по 07 ноября 2021 года, то есть примерно 7 лет. Связанная с ним сеть состояла из 266 изображений и 954 интерферограмм. Интервал сбора данных составлял в основном 24 дня до 18 февраля 2017 года и 12 дней после этой даты, что было обусловлено увеличением наблюдательных возможностей благодаря наличию Sentinel-1B, хотя все данные были получены Sentinel-1A. Стоит отметить, что даты начала сбора данных не совпадают для всех снимков из-за неоднородной стратегии наблюдений Sentinel-1.

График базовой линии - полезный инструмент визуализации для понимания метода SBAS. Он показывает временное и пространственное распределение интерферограмм, используемых для получения временных рядов деформации. Горизонтальная ось графика представляет собой время, а вертикальная ось – перпендикулярную базовую линию между двумя радиолокационными изображениями, использованными для создания каждой интерферограммы.

Типичный график базовой линии для метода SBAS содержит ряд линий или точек, представляющих интерферограммы, используемые в процессе обработки. Точки или линии

будут выделены цветом в зависимости от перпендикулярного расстояния между двумя радиолокационными изображениями, использованными для создания интерферограммы. Чем больше расстояние между базовыми линиями, тем больше разница фаз между двумя изображениями и тем чувствительнее интерферограмма к деформации.

График базовой линии (рисунок 4) может дать важное представление о качестве и надежности временных рядов деформации, полученных с помощью метода SBAS. Он может помочь выявить области с плохой когерентностью, что может привести к неточным измерениям деформации. Он также может выделить области с высокой скоростью деформации, которые могут потребовать дальнейшего изучения. Горизонтальная ось указывает на дату съемки (в днях), в то время как вертикальная отображает положение спутника в космосе (в метрах). Каждая точка на графике соответствует спутниковому изображению, а каждая линия представляет интерферограмму.

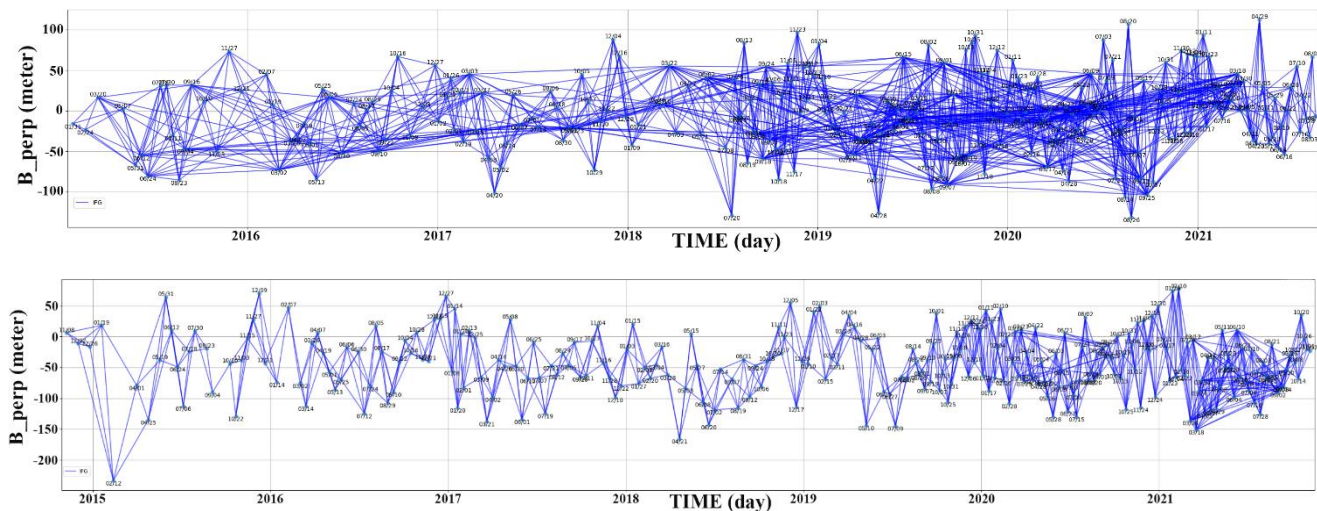


Рисунок 4. Сеть подключения SBAS для восходящей (сверху) и нисходящей (снизу) орбит

Индексы шума количественно оценивают уровень шума в каждом пикселе и включают такие метрики, как когерентность, стандартное отклонение и количество доступных данных, представленных в таблице 1. Эти индексы используются для выявления ненадежных пикселей в данных временных рядов. Маскировка шумных пикселей имеет решающее значение для обеспечения точности и надежности полученных данных смещения. Наличие шумных пикселей может значительно повлиять на анализ смещений и привести к ошибочным интерпретациям.

Таблица 1 – Индекс шума

Индекс шума	Значение
coh_avg	Среднее значение интерферометрической когерентности по стеку (от 0 до 1)
n_unw	Количество развёрнутых данных, использованных в расчёте временных рядов
Vstd	Стандартное отклонение скорости (мм/год), оценённое на шаге 1-4
maxTlen	Максимальная продолжительность времени в соединённой сети (в годах). Чем больше значение, тем выше точность оценки скорости
n_gap	Количество промежутков в сети интерферограмм и разрывов временных рядов
Stc	Пространственно-временная согласованность (мм), которая представляет собой минимальное среднеквадратичное отклонение (RMS) двойных различий временных рядов в пространстве и времени между пикселем интереса и соседним пикселем среди всех соседних пикселей
n_ifg_noloop	Количество интерферограмм без петель, которые не могут быть проверены с помощью замыкания петель и, возможно, содержат неопределённые ошибки развёртывания
n_loop_err	Количество незамкнутых петель после уточнения сети на Шагах 1-2
resid_rms	Среднеквадратичное отклонение остатков в инверсии с малым базисом (SB) (мм)

Таким образом, третья глава представляет собой комплексное изложение и интерпретацию результатов, полученных в ходе эмпирического исследования, и дает ценное представление о

динамике смещения земной поверхности, вызванного деятельностью по добыче нефти и газа в районе исследования.

Правильная визуализация и интерпретация данных временных рядов очень важна, но большой объем связанных с ними данных может препятствовать плавной визуализации и интуитивной интерпретации. Для получения значимых и точных данных о смещениях очень важно выбрать соответствующую опорную зону, поскольку все измерения являются относительными, а не абсолютными. К сожалению, большинство программ не позволяют проводить интерактивное исследование и выбирать подходящий эталон методом проб и ошибок. Для решения этой проблемы LiCSBAS предоставляет интерактивный просмотрщик временных рядов с двумя графическими пользовательскими интерфейсами (рисунок 5).

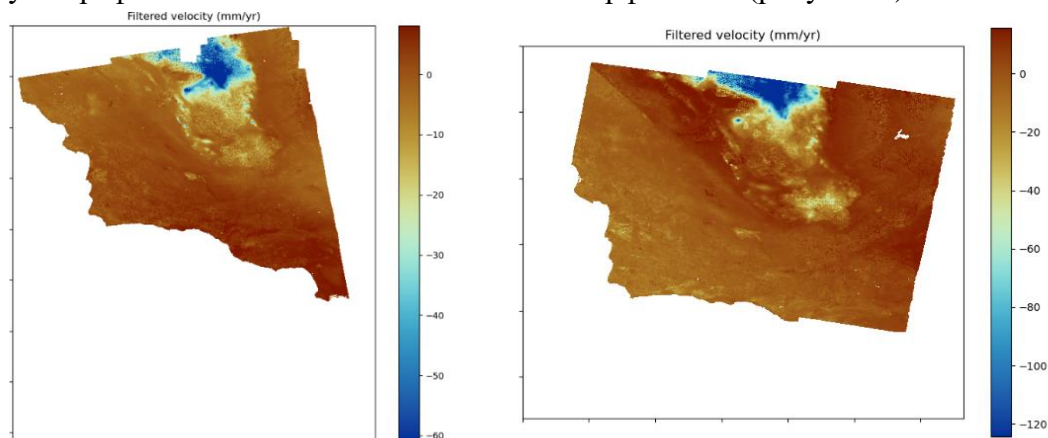


Рисунок 5. Карта скоростей перемещения для сцены восходящей (слева) и нисходящей (справа) орбит

В InSAR процесс декомпозиции восходящих и нисходящих данных означает разделение интерферометрической фазы (содержащей сигнал деформации) на две составляющие: составляющую, обусловленную рельефом (т.е. формой поверхности Земли), и составляющую, обусловленную деформацией поверхности. Такое разложение необходимо, поскольку на интерферометрическую фазу могут влиять как рельеф, так и деформация, и разделение этих двух компонентов позволяет выделить сигнал деформации. Разложение восходящих и нисходящих данных в InSAR обычно выполняется с помощью техники, называемой "базово-зависимым разложением", которая использует тот факт, что интерферометрическая фаза имеет различные характеристики в зависимости от того, смотрит ли радар на землю с восходящей или нисходящей орбиты. Сравнивая интерферометрическую фазу с восходящей и нисходящей орбиты, можно разделить топографическую и деформационную составляющие. В Licsbas InSAR разложение восходящих и нисходящих данных означает разделение радиолокационного сигнала на две составляющие в зависимости от направления движения спутника относительно поверхности Земли. Под восходящими данными понимаются измерения, выполненные при движении спутника с юга на север, а под нисходящими – измерения, выполненные при движении спутника с севера на юг.

Разложение восходящих и нисходящих данных обычно используется для разделения различных типов деформации, которые могут происходить на поверхности Земли. Как правило, восходящие данные более чувствительны к вертикальным деформациям, а нисходящие – к горизонтальным. Результаты показывают в двух направлениях вертикальном (север-юг) и горизонтальном (восток-запад) (рисунок 6).

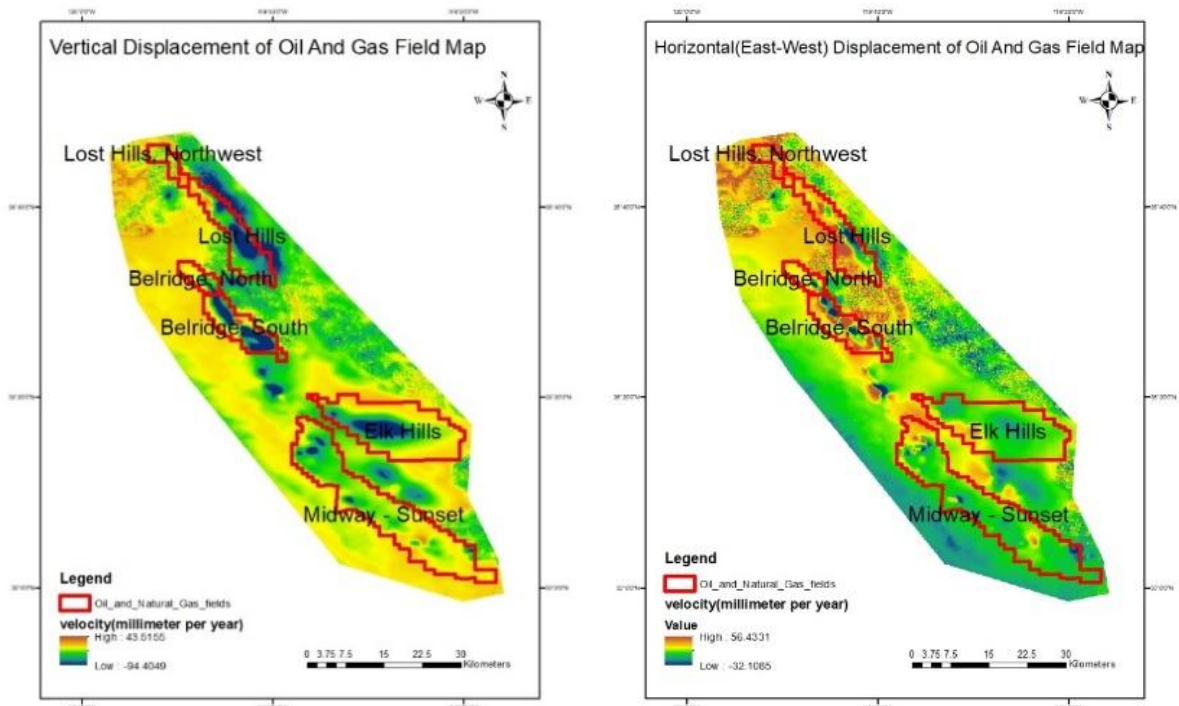


Рисунок 6. Карта скоростей вертикального(слева) и горизонтального (справа) смещений для месторождений нефти и газа

Значение RMSE, равное 1,894097, означает, что в среднем разница между измерениями SBAS InSAR и GPS составляет 1,894097 единиц. Коэффициент детерминации R^2 – статистический показатель, который дает информацию о том, насколько хорошо подходит регрессионная модель. В данном случае значение $R^2=0,9$ для направления восток-запад означает, что примерно 90% данных GPS соответствует данным, полученным методом SBAS InSAR. Вместе значения RMSE и R^2 дают более полное представление о совпадении двух наборов данных. Значение RMSE, равное 2, указывает на достаточно хорошую корреляцию между двумя наборами данных, а значение коэффициента детерминации, указывает на сильную связь между данными GPS и SBAS InSAR в направлении восток-запад. Однако важно отметить, что эти значения могут меняться в зависимости от конкретного набора данных и условий, в которых проводились измерения (рисунок 7).

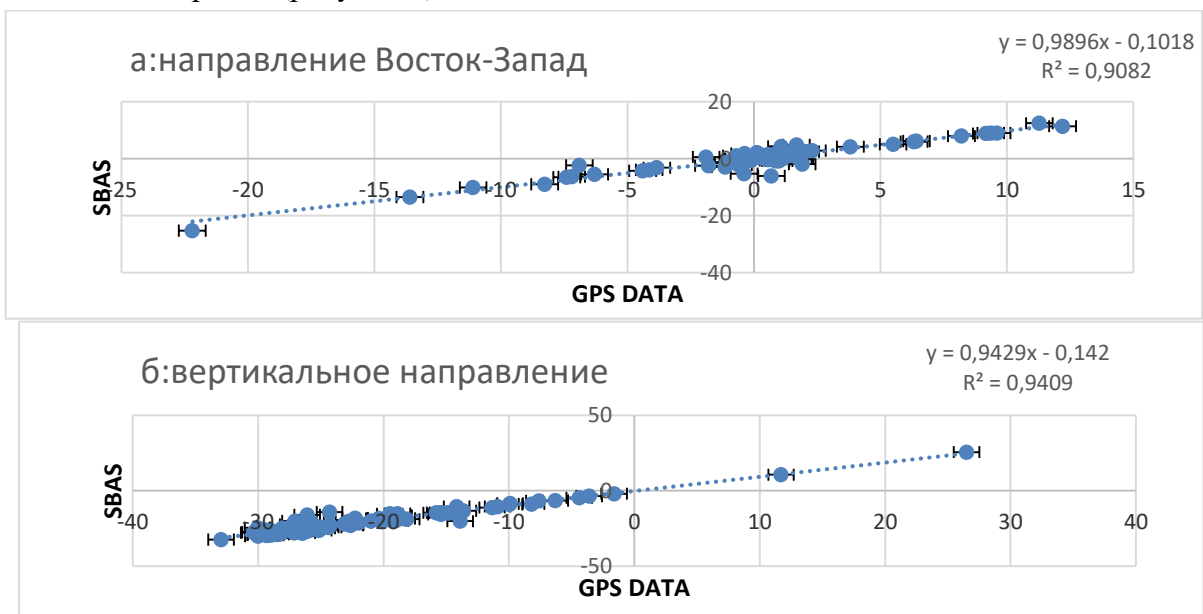


Рисунок 7. График корреляции между SBAS InSAR и GPS
а) направление Восток-Запад, б) вертикальное направление

В конце этого раздела сделано окончательное заключение по диссертации и подведены итоги основных выводов и вклада в исследование. В разделе также обсуждаются потенциальные возможности применения анализа SBAS-InSAR для мониторинга и управления просадками на нефтегазовых месторождениях, а также возможные направления и стратегии будущих исследований.

Сравнение различных нефтяных месторождений показало, что нефтяное месторождение Северный Белридж имеет самые высокие темпы смещения земной поверхности, со средней скоростью смещения 25 мм/год. На нефтяном месторождении Лост-Хиллз-Белридж также наблюдались высокие темпы смещения, в среднем 20 мм/год. Для сравнения, на месторождении Саут-Белридж скорость перемещения составляла около 10 мм/год, а на месторождении Мидуэй-Сансет – самая низкая, в среднем 5 мм/год.

Сравнение различных нефтяных месторождений проводилось с целью выявления различий в характере смещения земель между ними. Исследование показало, что самые высокие темпы смещения земель наблюдаются на месторождении Северный Белридж, за ним следуют месторождения Южный Белридж, Мидуэй-Сансет и Лост-Хиллз-Белридж. Самые высокие показатели перемещения были обнаружены на территориях, прилегающих к нефтедобывающим предприятиям, таким как нефтяные скважины, нагнетательные скважины и места сброса сточных вод.

Кроме того, исследование показало, что уровень перемещения земель на Северном и Южном месторождениях Белридж был значительно выше, чем на месторождениях Мидуэй-Сансет и Лост-Хиллз-Белридж. Это может быть связано с несколькими факторами, включая тип нефтяного пласта, глубину залегания, историю добычи и методы извлечения нефти, используемые на каждом месторождении.

В предыдущих исследованиях также проводилось сравнение моделей смещения земли на различных нефтяных месторождениях с помощью методов InSAR.

Это подчеркивает важность сравнения моделей смещения земель на различных нефтяных месторождениях для лучшего понимания основных причин и потенциального воздействия на окружающую среду и близлежащие населенные пункты. Анализ временных рядов смещения земной поверхности показал, что скорость смещения изменялась с течением времени. На нефтяных месторождениях Северный Белридж и Лост-Хиллз-Белридж наблюдалось постоянное увеличение коэффициентов перемещения с 2014 по 2016 год, затем они несколько снизились до 2018 года, после чего снова начали расти. На нефтяных месторождениях Южный Белридж и Мидуэй-Сансет коэффициенты вытеснения были относительно стабильными в течение анализируемого периода, с небольшими колебаниями.

Был проведен анализ временных рядов на основе данных InSAR для изучения закономерностей перемещения земель на четырех нефтяных месторождениях. Анализ временных рядов предполагает отслеживание деформации поверхности во времени для выявления закономерностей и тенденций в смещении. Для каждого нефтяного месторождения был построен график временного ряда, показывающий смещение поверхности земли с течением времени. Для построения графика использовались значения смещения, извлеченные из интерферограмм для каждого временного шага.

Графики временных рядов показывают, что смещение поверхности земли изменяется со временем на всех четырех нефтяных месторождениях. На месторождении Северный Белридж тенденция смещения с течением времени относительно стабильна с некоторыми колебаниями в скорости смещения. На месторождении Южный Белридж наблюдается аналогичная картина перемещения, но с более стабильной тенденцией. На нефтяном месторождении Мидуэй-Сансет

наблюдается тенденция увеличения смещения с течением времени, что указывает на ускорение оседания. На нефтяном месторождении Лост-Хиллз-Белридж наблюдается иная картина: относительно стабильная тенденция смещения в первой половине исследуемого периода, за которой следует резкое увеличение скорости смещения в 2020 году.

Анализ временных рядов дает ценную информацию о характере перемещения земной поверхности на четырех нефтяных месторождениях. Анализ также позволяет выявить потенциальные причины перемещения земель, что рассматривается в следующем разделе. В целом, анализ временных рядов с использованием данных InSAR дает представление о долгосрочной динамике перемещения земель на четырех нефтяных месторождениях.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

- Описан метод анализа данных SBAS-InSAR, включающий предварительную обработку, генерацию интерферограмм и анализ временных рядов.
- Сформулирован и решен ряд новых задач точного и детального определения смещения земной поверхности с использованием метода базовых линий SBAS-InSAR, предусматривающих возможность использования разновременных данных с минимизацией потери точности, вызванных атмосферой и рельефом.
- Получены данные InSAR, включая интерферограммы, карты когерентности и карты смещений, для различных участков исследования или временных периодов.
- Разработан программно-математический аппарат, реализованный на языке Python, используемый для обработки и анализа данных InSAR. Комплекс имеет развитый графический интерфейс пользователя, обеспечивающий ввод-вывод данных, управление процессом обработки данных InSAR и графическое представление результатов анализа.
- Предложен метод статистического анализа радиолокационных данных InSAR, определяющий зависимость скорости движения земной коры и темпов добычи нефти.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Iman Khosravi, Yury Razoumny, **Javad Hatami Afkoeieh**, Seyed Kazem Alavipanah. Fully polarimetric synthetic aperture radar data classification using probabilistic and non-probabilistic kernel methods (Классификация данных полностью поляриметрического радара с синтезированной апертурой с использованием вероятностных и невероятностных ядерных методов) / *European Journal of Remote Sensing*, 54(1), pp.310-317. DOI <https://doi.org/10.1080/22797254.2021.1924081>
2. Iman Khosravi, Yury Razoumny, **Javad Hatami Afkoeieh**, Seyed Kazem Alavipanah. An ensemble method based on rotation calibrated least squares support vector machine for multi-source data classification (Ансамблевый метод на основе калиброванной по вращению машины опорных векторов с наименьшими квадратами для классификации данных из нескольких источников) / *International Journal of Image and Data Fusion* 12, no. 1 (2021): 48-63. DOI <https://doi.org/10.1080/19479832.2020.1821101>
3. Sadegh Karimi-Rizvandi, Hamid Valipoori Goodarzi, **Javad Hatami Afkoeieh**, Il-Moon Chung, Ozgur Kisi Sungwon Kim, Nguyen, Thi Thuy Linh. Groundwater-potential mapping using a self-learning bayesian network model: A comparison among metaheuristic algorithms / *Water* 13, no. 5 (2021): 658. DOI <https://doi.org/10.3390/w13050658>
4. Sahar Amiri-Doumari, Ahmadreza Karimpour, Seyed Nader Nayeypour, **Javad Hatamiafkoeieh**. Integration of group method of data handling (GMDH) algorithm and population-based metaheuristic algorithms for spatial prediction of potential groundwater (Интеграция алгоритма группового метода обработки данных (GMDH) и популяционных метаэвристических алгоритмов для пространственного прогнозирования потенциальных подземных вод) / *Environmental Earth Sciences* (2022) 81:48 <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10593-5>
5. Mohammad Hijji, Tzu-Chia Chen Muhammad Ayaz, AliS. Abosinnee, Iskandar Muda, Yury Razoumny and **Javad Hatamiafkoeieh**. Optimization of state of the art fuzzy-based machine learning techniques for surface water quality prediction in the coastal region (Оптимизация современных методов машинного обучения на основе нечетких данных для прогнозирования качества поверхностных вод в прибрежном регионе) / *Sustainability* 15, no. 8 (2023): 7016. <https://doi.org/10.3390/su15087016>
6. Khabat Khosravi, Fatemeh Rezaie; James R. Cooper; Zahra Kalantari; soroush abolfathi; **Javad Hatamiafkoeieh**. Soil water erosion susceptibility assessment using deep learning algorithms (Оценка восприимчивости почв к водной эрозии с помощью алгоритмов глубокого обучения) / *Journal of Hydrology*, 618, p.129229 [10.1016/j.jhydrol.2023.129229](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129229)
7. Solmaz Khazaei Moughani; Abdolbaset Osmani; Ebrahim Nohani; Saeed Khoshtinat; Tahere Jalilian; Zahra Askari; Salim Heddami; John P. Tiefenbacher; **Javad Hatamiafkoeieh**. Groundwater spring potential prediction using a deep-learning algorithm (Прогнозирование потенциала подземных источников с помощью алгоритма глубокого обучения) *Acta Geophysica* (2023): 1-22. [10.1007/s11600-023-01053-0](https://doi.org/10.1007/s11600-023-01053-0)
8. Seyed Vahid Razavi-Termeh; **Javad Hatamiafkoeieh**; Abolghasem Sadeghi-Niaraki; Soo-Mi Choi; Khalifa M. Al-Kindi. A GIS-based multi-objective evolutionary algorithm for landslide susceptibility mapping (Многоцелевой эволюционный алгоритм на основе ГИС для картографирования восприимчивости к оползням) / *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* (2023): 1-26. [10.1007/s00477-023-02562-6](https://doi.org/10.1007/s00477-023-02562-6)
9. Yury Razoumny; **Javad Hatamiafkoeieh**; Sajjad Zeraat Peyma. InSAR Applications of Land Subsidence Over Oil Fields (Case Study Southeast of Republic of Tatarstan, Russia) / In *International Conference of Remote Sensing and Space Sciences Applications*, pp. 153-159. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022. [10.1007/978-3-031-40447-4_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-40447-4_18)

АННОТАЦИЯ ДИССЕРТАЦИИ

В диссертации рассматриваются методы обработки мультитемпоральных композитных радиолокационных данных для осуществления мониторинга движения в динамически опасных ситуациях с акцентом на смещение грунта как значительную экологическую проблему, связанную с добычей нефти и газа. Исследована возможность и эффективность использования метода SBAS-InSAR (Small Baseline Subset) для мониторинга смещения грунта на пяти нефтяных месторождениях в округе Керн, Калифорния (Норт-Белридж, Саут-Белридж, Мидуэй-Сансет, Лост-Хиллз и Элк-Хиллз). Рассматриваются методологические проблемы, такие как атмосферные помехи и декорреляция данных, а также предлагаются стратегии повышения точности данных SAR для обеспечения надежных, высокоразрешающих и временно-чувствительных измерений движения грунта. Представлен полуавтономный подход к извлечению деформаций и использован многомерный анализ с помощью изображений SAR на восходящей и нисходящей орбитах, дополненный отслеживанием смещения пикселей для мониторинга низкокогерентных зон. Этот интегрированный подход дает комплексное понимание динамики смещения земной коры.

С использованием метода SBAS-InSAR через инструменты LiCSBAS и портал Comet проанализированы данные спутника Sentinel-1 для выполнения временного анализа и изучения эволюции смещения грунта. На восходящей орбите наблюдения охватывали 6,6 лет и включали сеть из 256 изображений и 1499 интерферограмм. Аналогичный анализ проведен на нисходящей орбите.

Исследование предоставляет детальное понимание моделей смещения поверхности, факторов, способствующих этим процессам, и потенциальных рисков в зонах добычи нефти и газа.

DISSERTATION ABSTRACT

The dissertation discusses methods for processing multitemporal composite radar data for monitoring movement in dynamically dangerous situations with an emphasis on land displacement as a significant environmental issue linked to oil and gas extraction. This research explores the feasibility and effectiveness of the Small Baseline Subset (SBAS) InSAR technique for monitoring land displacement in five oil fields in Kern County, California (North Belridge, South Belridge, Midway-Sunset, Lost Hills, and Elk Hills). It addresses methodological challenges such as atmospheric interference and data decorrelation, while implementing strategies to improve SAR data accuracy for reliable, high-resolution, and time-sensitive measurements of ground movement. The study also introduces a semi-autonomous approach for extracting deformations and utilizes multi-dimensional analysis through ascending and descending SAR images, complemented by pixel offset tracking to monitor low-coherence areas. This integrated framework delivers comprehensive insights into the dynamics of land displacement.

Utilizing the SBAS-InSAR method through the LiCSBAS toolbox and Comet Portal, Sentinel-1 satellite data were analyzed to perform time-series analysis and examine the temporal evolution of land displacement. In the ascending orbit, observations spanned 6.6 years, with a network of 256 images and 1499 interferograms. In the descending orbit, similar analyses were conducted.

The study provides a detailed understanding of surface displacement patterns, contributing factors, and potential hazards in oil and gas extraction regions.