

Применение спутниковой радарной интерферометрии для анализа смещений земной поверхности

Р.В. Шевчук^{1, 2} ✉, А.И. Маневич^{1, 2}, Д.Ж. Акматов^{1, 2}, И.В. Лосев^{1, 2}, А.А. Камаев^{1, 2}

¹ Геофизический центр Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация
✉ Shevchuk.002@mail.ru

Резюме: В статье представлены результаты анализа современных деформаций земной поверхности по результатам спутниковых радиолокационных данных Sentinel-1 с применением методов дифференциальной радиоинтерферометрии. Исследование направлено на выявление пространственных особенностей смещений и оценку геодинамической стабильности территории в условиях отсутствия выраженной тектонической активности. Полученные данные позволили провести качественную и количественную интерпретацию структуры смещений вдоль линии визирования радара, что дало возможность охарактеризовать деформационные процессы с высокой степенью достоверности. Пространственный анализ смещений не выявил выраженных аномалий, связанных с активной геодинамикой или техногенными воздействиями. Общая картина деформационного поля носит фоновый, устойчивый характер и подтверждает стабильное состояние земной поверхности в пределах исследуемой территории. Отсутствие интенсивных смещений и систематических изменений геометрии рельефа позволяет сделать вывод о том, что в исследуемом интервале наблюдений не зафиксированы значимые процессы тектонического или техногенного происхождения. Результаты демонстрируют научную и практическую значимость применения методов спутниковой интерферометрии при дистанционном мониторинге состояния земной поверхности. Использование радиоинтерферометрических данных обеспечивает объективную, регулярную и пространственно непрерывную оценку деформационной активности, что особенно актуально в условиях ограниченной наземной наблюдательной сети. Полученные выводы могут быть использованы в системах геоэкологического контроля, инженерного планирования и геодинамического районирования.

Ключевые слова: спутниковая радиоинтерферометрия, дифференциальная интерферометрия, Sentinel-1, смещения земной поверхности, геодинамический мониторинг, LOS-смещения, дистанционное зондирование

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России.

Для цитирования: Шевчук Р.В., Маневич А.И., Акматов Д.Ж., Лосев И.В., Камаев А.А. Применение спутниковой радарной интерферометрии для анализа смещений земной поверхности. *Горная промышленность*. 2025;(6):97–104. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-97-104>

Application of satellite radar interferometry for surface displacement analysis

R.V. Shevchuk^{1, 2} ✉, A.I. Manevich^{1, 2}, I.V. Losev^{1, 2}, D.Zh. Akmatov^{1, 2}, A.A. Kamaev^{1, 2}

¹ Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

² National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation
✉ Shevchuk.002@mail.ru

Abstract: This article presents the results of analyzing contemporary surface deformations based on Sentinel-1 satellite radar data using the differential radar interferometry (DInSAR) methods. The study focuses on identifying the spatial characteristics of displacements and assessing the geodynamic stability of the territory in the absence of pronounced tectonic activity. The data obtained enabled both qualitative and quantitative interpretation of the displacement structures along the radar line of sight, providing a high level of reliability in characterizing the deformation processes. The spatial analysis revealed no significant anomalies associated with the active geodynamics or man-induced impact. The overall deformation field demonstrates a background, stable character, confirming the tectonic stability of the Earth's surface within the study area. The absence of intense displacements or systematic changes in the terrain geometry suggests that no notable tectonic or man-induced processes occurred during the observation period. The results highlight the scientific and practical relevance of applying satellite

interferometry methods for remote monitoring of the Earth's surface condition. The use of radar interferometric data ensures an objective, regular, and spatially continuous assessment of the deformation activity, which is particularly important under conditions of limited ground-based observational infrastructure. The findings can be applied in geoenvironmental control systems, engineering planning, and geodynamic zoning.

Keywords: satellite radar interferometry, differential interferometry, DInSAR, Sentinel-1, surface displacement, geodynamic monitoring, LOS displacement, remote sensing

Acknowledgments: This work was conducted in the framework of budgetary funding of the Geophysical Center of RAS, adopted by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Shevchuk R.V., Manevich A.I., Losev I.V., Akmatov D.Zh., Kamaev A.A. Application of satellite radar interferometry for surface displacement analysis. *Russian Mining Industry*. 2025;(6):97–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-97-104>

Введение

Горнодобывающая промышленность играет ключевую роль в обеспечении энергетических и сырьевых потребностей современного общества: свыше 80% мировых энергетических ресурсов и более 90% промышленных материалов поступают из недр Земли в результате добычи полезных ископаемых – таких как нефть, природный газ, уголь и минеральное сырьё [1]. Однако традиционные методы геодезического мониторинга, такие как ГНСС-наблюдения [2; 3], высокоточное нивелирование и тахеометрическая съёмка, обладают рядом ограничений: высокая стоимость, ограниченность по площади охвата, низкая пространственная разрешающая способность и значительная трудоёмкость.

На фоне указанных ограничений особенно выделяются технологии дистанционного зондирования, в частности, интерферометрическая радиолокация с синтезированной апертурой (InSAR). Этот метод позволяет осуществлять измерения деформаций земной поверхности с субсантиметровой точностью на больших площадях при высокой пространственной детализации и минимальных эксплуатационных затратах. В некоторых случаях InSAR способен охватывать зоны шириной до 250 км с пространственным разрешением порядка 5×20 м, что делает его уникальным инструментом для месторождений с трудноустраняемыми или слабоизученными процессами деформации [4; 5]. InSAR представляет собой метод активного микроволнового зондирования, в основе которого лежит регистрация амплитудно-фазовых характеристик рассеянного сигнала от элементов поверхности в пределах разрешающей ячейки. Эти характеристики выражаются в виде комплексных значений, что позволяет анализировать смещения земной поверхности с высокой точностью [4].

В работах [6–8] описывается использование РСА-интерферометрии для мониторинга деформаций земной поверхности при использовании подземного хранилища природного газа в Италии, Нидерландах, США и Канаде. Результаты исследований показывают, что РСА-интерферометрия является полезным инструментом для мониторинга и контроля деформаций земной поверхности, дающим возможность получать поле непрерывно распределённых смещений. Это позволяет выявлять опасные аномалии более эффективно, чем наземной геодезической съёмкой. В основе большинства указанных явлений лежат деформации земной поверхности, возникающие вследствие перераспределения напряжений и изменения геометрии горного массива [9]. В исследовании [10] определялись деформации земной поверхности нефтяного месторождения Тенгиз (Казахстан). Анализ данных ENVISAT за 2004–2009 гг. выявил четко вы-

раженное оседание грунта с максимальной скоростью до –15,7 мм/год, подтверждённое данными геометрического нивелирования. Последующее применение РСА-интерферометрии к данным Sentinel-1 выявило значительную эволюцию смещений на месторождении в 2016–2017 г. до –79,3 мм/год [10]. Исследование [4] показало, что для оценки вертикальной деформации нецелесообразно проводить расчеты для восходящей и нисходящей траектории съёмки из-за недостаточной вычислительной мощности и объема памяти вычислительных сетей. В таких случаях смещения могут быть получены в направлении нисходящего полета. В работе [5] использованы угольные отражатели вдоль заглубленных нефтепроводов для обнаружения малых по величине движений земной поверхности и трубопровода. В работе [11] использован комплекс методов, таких как РСА-интерферометрия, ГИС-анализ, полевые геодезические измерения и геомеханическое моделирование, для выявления опасностей проявления вдоль трубопроводов. В работе [12] приводится пример организации мониторинга газопроводов с помощью РСА-интерферометрии и радиолокационных спутниковых изображений миссии TerraSAR-X. Наблюдение и количественная оценка пространственно-временной эволюции таких деформаций необходимы для интерпретации механизмов деформационного отклика геосреды, построения прогностических моделей и оценки уровня техногенных рисков.

С момента получения первого интерферометрического изображения деформаций в 1989 г. были разработаны различные подходы к мониторингу подвижек земной поверхности с использованием амплитудной и/или фазовой информации радиолокационных изображений. Условно такие методы можно классифицировать на две основные категории:

1. Методы картирования деформаций (одиночные пары SAR-снимков):

- дифференциальная интерферометрия (DInSAR);
- интерферометрия с несколькими апертурами (MAI);
- отслеживание смещений пикселей (Offset Tracking, OT).

2. Методы временного анализа деформаций (TS-InSAR), использующие множество снимков:

- постоянные рассеиватели (PS-InSAR);
- метод малых базисов (SBAS-InSAR);
- гибридные и расширенные модификации (например, SqueeSAR).

Дифференциальная интерферометрия (DInSAR). DInSAR – один из наиболее известных и широко используемых методов InSAR, основанный на анализе интерферометрической фазы двух когерентных SAR-снимков, полученных

с одного и того же ракурса, но в разные моменты времени. Радарные данные за счет большей длины электромагнитной волны имеют пропорционально большую проникающую способность в сравнении с оптическими данными. Разность фаз интерферограммы содержит несколько составляющих: топографическую, орбитальную, атмосферную, шумовую и собственно деформационную. После устранения влияния рельефа (с помощью цифровых моделей высот), орбитальных ошибок, атмосферных возмущений и фазовых шумов остаётся компонент, связанный с перемещениями поверхности вдоль линии визирования радара. Эта составляющая масштабируется в реальные смещения с использованием известной длины волны радара. Таким образом, можно получить поле однокомпонентных деформаций с точностью до сантиметров и миллиметров.

Интерферометрия с несколькими апертурами (MAI). В отличие от DInSAR метод MAI позволяет измерять смещения вдоль азимутального направления (вдоль трека спутника), используя фазовую разность между изображениями, полученными с субапертур радара (вперёд и назад смотрящие направления антенны). Основной принцип – разделение сигнала на четыре субапертурных изображения и построение двух интерферограмм, из которых по формальным уравнениям вычисляется компонент смещения в азимутальном направлении.

Отслеживание смещений пикселей (Offset Tracking). Этот метод основан на сопоставлении амплитудных или фазовых изображений для определения смещений пикселей в диапозонном (LOS) и азимутальном направлениях. Основу составляет алгоритм кросс-корреляции, аналогичный оптическому сопоставлению изображений.

Методы временного анализа деформаций (TS-InSAR). Рассмотренные ранее методы (DInSAR, MAI, OT) работают с одной парой SAR-снимков и потому позволяют оценить деформации лишь за конкретный временной интервал между двумя датами съёмки. Однако в горнодобывающих районах чрезвычайно важно отслеживать динамику деформаций в течение длительного времени. Для этих целей были разработаны методы временного анализа InSAR (Time Series InSAR, TS-InSAR), которые используют последовательности более чем двух снимков.

Основы интерферометрической обработки спутниковых данных для построения схем LOS смещений

Снимки, выполненные спутниковыми радарными с синтезированной апертурой (PCA, в английской литературе SAR – Synthetic Aperture Radar), позволяют оценить смещения земной поверхности за период съёмки (рис. 1). Эти результаты дают возможность исследовать различные процессы. Наиболее часто используемые частоты в системах PCA и соответствующие им диапазоны длин волн приведены в табл. 1.

Примеры применения съёмок в различных диапазонах: 1) оценка объема листвы, визирование области под ее поверхностью и оценка биомассы в L- и P- диапазонах;

2) мониторинг агрокультур, океана, обледенения в X-, C-, S-, L- диапазонах; 3) мониторинг снежного покрова в Ku- и X-диапазонах; 4) мониторинг земной поверхности с очень высоким разрешением в Ka- и X- диапазонах. Самыми используемыми частотными диапазонами являются X, C, L.

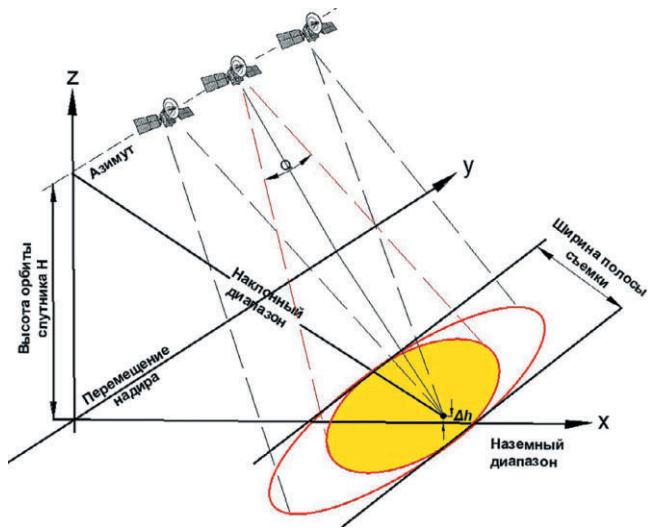


Рис. 1
Иллюстрация геометрии PCA-визуализации

Fig. 1
An example of the PCA visualization geometry

На рис. 2 представлена обобщённая схема декомпозиции наблюдаемой интерферометрической фазы, полученной методом спутниковой радиоинтерферометрии с синтезированной апертурой (InSAR). Интерферометрическая фаза, полученная в результате когерентного вычитания двух радарных изображений, зафиксированных с орбиты в разное время, представляет собой совокупный сигнал, включающий как полезную компоненту, связанную с деформациями земной поверхности, так и ряд паразитных вкладов. *Верхний слой* визуализирует фазовые переходы, обусловленные изменением длины пути распространения радиоволны между спутником и наблюдаемой точкой земной поверхности. Эта составляющая отражает совокупность процессов, включая тектонические смещения, осадки, подвижки грунтов, а также технические и орбитальные эффекты. *Средний слой* иллюстрирует атмосферные возмущения, оказывающие влияние на фазу радиосигнала. Наиболее существенный вклад вносит тропосферная задержка, связанная с пространственно-временными изменениями температуры, давления и влажности. Атмосферные эффекты имеют пространственно коррелированный характер и могут достигать амплитуды, сопоставимой с геофизическим сигналом. *Нижний слой* отражает ошибки фазового развёртывания (unwrapping errors), возникающие при преобразовании обёрнутой (модульной) фазы в непрерывную. Эти ошибки характерны для областей с низкой когерентностью или резкими фазовыми градиентами и могут существенно исказить интерпретацию деформационного поля.

Таблица 1
Наиболее часто используемые частоты в системах PCA

Диапазон частот	Ka	Ku	X	C	S	L	P
Частота, ГГц	40–25	17,6–12	12–7,5	7,5–3,75	3,75–2	2–1	0,5–0,25
Длина волны, см	0,75–1,2	1,7–2,5	2,5–4	4–8	8–15	15–30	60–120

Table 1
The most commonly used frequencies in the PCA systems

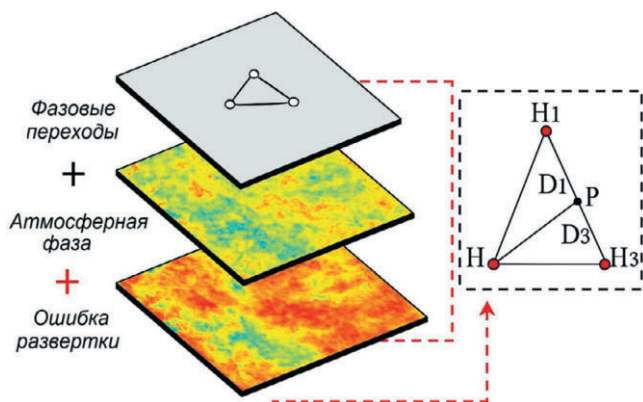


Рис. 2
Схема декомпозиции наблюдаемой интерферометрической фазы

Fig. 2
A schematic representation of the observed interferometric phase decomposition

Интерферометрическая фаза каждого пикселя РСА-изображения будет зависеть только от разности путей прохождения от каждого из двух РСА до рассматриваемой ячейки разрешения. Соответственно, вычисленная интерферограмма содержит изменение фазы ϕ складами от нескольких факторов, наиболее важные из которых:

фаза кривизны Земли

$$\phi_{\text{flat}} = - \frac{\Delta q}{\sin \theta} \cdot \frac{B_n}{R_0} \cdot \frac{4\pi}{\lambda},$$

топографическая фаза земной поверхности

$$\phi_{\text{DEM}} = - \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_n s}{R \tan \theta}$$

(можно объединить в ϕ_0), атмосферные условия ϕ_{atm} (изменение влажности, температуры и давления между периодами двух измерений) и другие шумы ϕ_N (смена отражателей, разные углы обзора и объемное рассеяние) и, наконец, возможное смещение на поверхности ϕ_{def} , которое произошло между двумя измерениями (рис. 3) [13–15]:

$$\phi = W\{\phi_{\text{def}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{orb}} + \phi_0 + \phi_N\},$$

где ϕ_{def} – деформационная составляющая; ϕ_{atm} – набег фазы из-за изменения атмосферных условий между двумя моментами съемки; ϕ_{orb} – составляющая, вызванная неточностями знания орбит из-за ошибок измерения параметров относительного движения и ошибок ориентации спутника; ϕ_0 – составляющая из-за ошибок угла обзора, обычно называемая ошибкой цифровой модели рельефа, также в ней может присутствовать неточность определения положения фазового центра; ϕ_N – фазовый шум (помеха, обусловленная изменением характеристик отражателей, тепловым шумом, ошибками корегистрации, аппаратными искажениями); $W\{\dots\}$ – оператор свертки по модулю 2π :

Вклад поверхности Земли (ϕ_{DEM} и ϕ_{flat}) считается равным для обоих изображений и удаляется из их интерферограммы, чтобы оставшееся изменение фазы можно было отнести к изменениям поверхности между двумя изображениями. Влияние атмосферы и других шумов нужно свести к минимуму, чтобы получить лучший результат. Делается это по причине того, что эти влияния сложно смоделировать, поэтому рекомендуется по возможности использовать изображения без этих шумов и с небольшой перпендику-

$$\phi = \phi_{\text{DEM}} + \phi_{\text{flat}} + \phi_{\text{disp}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}}$$

$$\begin{aligned} & -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n s}{R \tan \theta} \\ & -\frac{\Delta q}{\sin \theta} \cdot \frac{B_n}{R_0} \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \\ & + \frac{4\pi}{\lambda} d \end{aligned}$$

Рис. 3
Распределение интерферометрических SAR фаз

Fig. 3
Distribution of the interferometric SAR phases

лярной базовой линией [15]. В значении фазы каждого пикселя РСА-снимка присутствует составляющая, связанная с атмосферными неоднородностями. Наличие атмосферных помех в каждом РСА-снимке снижает точность оценки деформаций земной поверхности методом радарной интерферометрии [9; 16].

Используемые спутниковые данные миссии Sentinel-1

Радарные данные отбирались из каталога спутниковой миссии ESA Sentinel-1A, B. Спутниковая миссия Sentinel-1A, B – это два радиолокационных спутника, запущенных в 2014 и 2016 гг. соответственно в рамках программы Европейского космического агентства (ESA) по мониторингу Земли Copernicus. Радарные данные, получаемые с помощью инструмента SAR на борту Sentinel-1A, B, могут использоваться для мониторинга изменений в природной среде, включая леса, водные ресурсы, ледники, почву, а также для наблюдения за населенными пунктами, инфраструктурой и административными границами. Кроме того, они широко применяются в геологии, геодезии, агрокультуре, лесном хозяйстве, метеорологии и многих других областях. Технические параметры Sentinel-1A, B:

- орбитальная система: Солнечно-синхронная орбита (SSO);
- высота орбиты: 693 км;
- период обращения: 98,5 мин;
- наклонение орбиты: 98,18 град;
- покрытие: 100% земной поверхности (включая океаны и полярные регионы);
- разрешение: до 5 м;
- частота обновления данных: от 6 до 12 дней (в зависимости от режима работы);
- инструмент: синтетическая апертурная радиолокация (SAR);
- частота радиоволн: 5,405 и 5,685 ГГц (для Sentinel-1A), 5,405 и 5,725 ГГц (для Sentinel-1B);
- длина волны: 5,6 и 5,2 см (для Sentinel-1A), 5,6 и 5,2 см (для Sentinel-1B);
- поляризация: горизонтальная (HH), вертикальная (VV), комбинированная (HV) и обратная комбинация (VH);
- режимы работы: Interferometric Wide Swath (IW), Extra Wide Swath (EW), Stripmap (SM) и Wave (WV).

Основным инструментом спутников является синтетическая апертурная радарная система, которая позволяет получать изображения поверхности Земли в любых условиях освещения и погоды, включая туман, облака и ночное время суток. Радарная система Sentinel-1 работает в диапазоне так называемой С-частоты (длина волны от 3,9 до 7,5 см, частота от 8 до 4 ГГц соответственно).

Получение данных осуществлялось с помощью портала

Sentinel Data (<https://scihub.copernicus.eu/> или <https://search.asf.alaska.edu/>). Географическое местоположение исследуемого участка попадает в охват снимков как с восходящей, так и нисходящей орбиты (рис. 4). С целью анализа смещений земной поверхности отбираются спутниковые снимки, в том числе соответствующие периодам инструментальных наземных наблюдений. Тип продукта соответствует сфокусированным комплексным данным (SLC), тип поляризации – VV, тип съемки – широкополосная интерферометрия (IW). На рис. 5 приведены временные серии исходных радарных спутниковых снимков VV-поляризации территории:

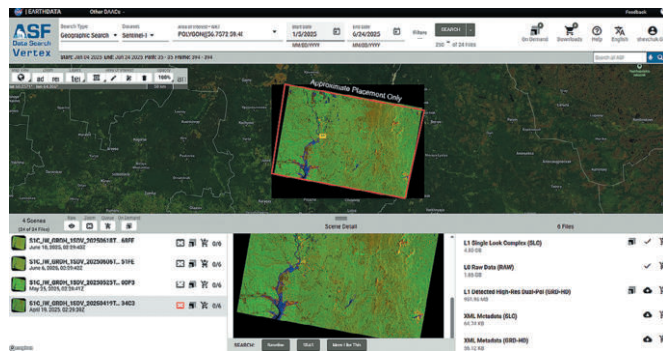


Рис. 4
Охват используемых спутниковых данных для района исследования

Fig. 4
Coverage of the satellite data used for the study area

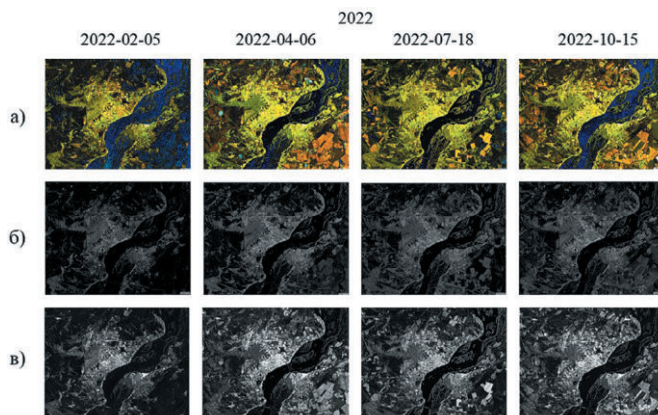


Рис. 5
Космические снимки со спутника Sentinel-1, совпадающие с периодами маршейдерско-геодезических измерений: а – композит поляризаций VV-VH-VV; б – ортотрансформированный вид VH-поляризации; в – ортотрансформированный вид VV-поляризации

Fig. 5
Images from the Sentinel-1 satellite, corresponding to the periods of mine surveying and geodetic measurements: а – composite of the VV-VH-VV polarizations; б – an orthotransformed view of the VH polarization; в – an orthotransformed view of the VV polarization

Особенности интерферометрической обработки данных исследуемой территории

В результате интерферометрической обработки данных исследуемой территории были получены серии LOS-смещений пар радарных снимков. Территория района является сложной с точки зрения возможности регистрации движений земной поверхности. Это проявляется с точки зрения двух факторов:

1. Большую часть спутникового снимка занимают водные объекты, для которых характерно однократное рассеивание и, как следствие, низкая когерентность данных (рис. 6). Абсолютные шумы при этом видны по р. Волге при однократном рассеивании. Также значительные площади вблизи занимают территории озелененные, с измененными почвами, что ведет, в свою очередь, к многократному рассеянию радарного сигнала, а также к низкой когерентности данных. Антропогенные объекты на исследуемой территории (дома, дороги) создают двукратное отражение сигнала, который в этом случае не рассеивается и отражается в принимающий сенсорный датчик, ведя к увеличению когерентности данных. Типичная картина когерентности радарных данных исследуемой территории приведена на рис. 7. Развернутая и отфильтрованная фаза сигнала в пределах границ исследуемой территории показывает разное распределение. Высокая когерентность данных характерна для устойчивых отражателей – объектов инфраструктуры. При этом для дороги, вдоль которой проложен профиль нивелирования, в непосредственной близости от домов когерентность данных уже низкая и не позволяет регистрировать смещения земной поверхности.

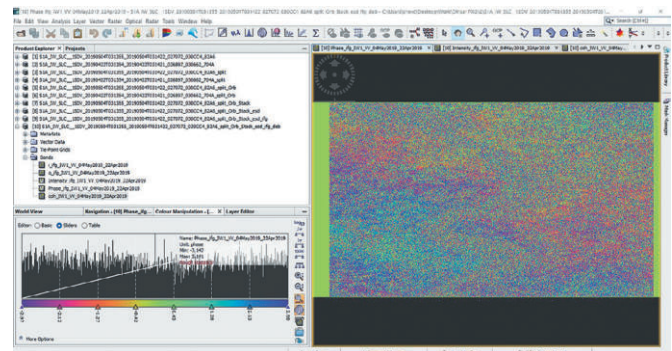


Рис. 6
Когерентность данных территории всего спутникового снимка до фильтрации

Fig. 6
Data coherence of the entire satellite image area, before filtering

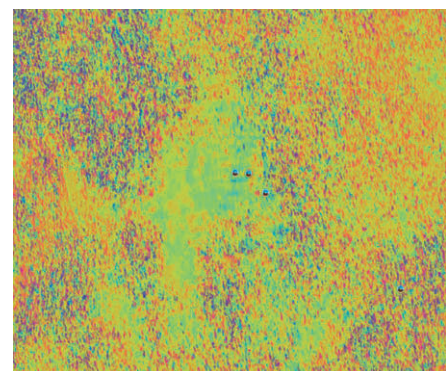


Рис. 7
Типичная когерентность данных исследуемой территории

Fig. 7
Data coherence typical for the study area

2. Низкие значения величин современных движений земной коры, что подтверждается анализом карт вертикальных движений за разные годы. Учитывая погрешность измерений околонулевых значений СВДЗК, данную терри-

торию следует относить к районам со стабильным геодинамическим режимом, который имеет постоянный характер движения, а не пульсационный, и при этом абсолютные скорости СВДЗК практически близки к нулевым.

Отсутствие больших абсолютных величин движений земной коры и отсутствие активных эндогенных геодинамических процессов и явлений [17–19], способных их вызывать, ведет также к снижению когерентности пар радарных снимков для построения полей смещений земной поверхности. Это связано с тем, что регистрация смещений земной поверхности методом дифференциальной спутниковой интерферометрии находится в пределах ошибки измерения самого метода PCA [20].

Анализ и интерпретация результатов

На финальном этапе интерферометрической обработки в программном комплексе SNAP получена карта смещений земной поверхности (рис. 8) по направлению линии визирования радара (LOS). Результирующий слой displacement_VV представляет собой растровое изображение, где каждому пикселю сопоставлено значение смещения, выраженное в метрах. Положительные значения соответствуют смещению поверхности в сторону радара (подъём), отрицательные – от радара (оседание). Цветовая палитра визуализации построена по принципу градации: жёлтые оттенки отображают области подъёма, синие – зоны оседания, зелёные – участки с минимальными изменениями. Пространственное распределение смещений позволяет визуально идентифицировать локальные аномалии, связанные с деформационными процессами. Особенно отчётливо выделяется зона интенсивного оседания в юго-восточной части изображения, что может указывать на развитие подповерхностных процессов или техногенное воздействие. Полученное изображение может быть использовано для дальнейшего количественного анализа, сопоставления с геологическими и инженерными данными, а также в задачах мониторинга устойчивости территорий.

Выводы

1. Отсутствие больших абсолютных величин движений земной коры и отсутствие активных эндогенных геодинамических процессов и явлений в районе исследуемой территории ведет к снижению когерентности пар радарных

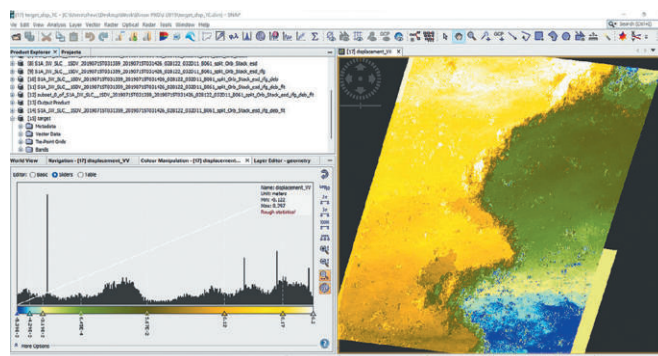


Рис. 8
Карта смещений земной поверхности

Fig. 8
A map of the ground surface displacements

снимков для построения схем LOS-смещений. Таким образом, регистрация природных смещений земной поверхности геодинамической природы изучаемого района методом дифференциальной спутниковой интерферометрии находится в пределах ошибки измерения самого метода PCA.

2. Методом PCA-интерферометрии не было зарегистрировано активизации природных геодинамических процессов и результатов техногенных смещений в результате нагнетания давления в хранилище газа. Внутренние движения по разломам также не регистрируются. В целом, анализируя схемы LOS-смещений, следует отметить, что вся территория за период наблюдений находится в стабильном геодинамическом режиме. Ярво выраженных LOS-смещений на исследуемой территории не выявлено.

3. Метод дифференциальной радарной интерферометрии применительно к районам с низкими скоростями смещений не может быть использован автономно и требует обязательного комплексирования с классическими методами маркшейдерско-геодезических наблюдений. Однако именно методы PCA-интерферометрии позволяют получать поле непрерывно распределенных LOS-смещений, что позволяет выявлять опасные аномалии более эффективно, чем периодической наземной съемкой.

Вклад авторов

Р.В. Шевчук – постановка научной задачи, общее руководство исследованием, научная координация команды, участие в обработке и интерпретации данных, формулировка выводов, редактирование итогового текста статьи.

А.И. Маневич – обработка спутниковых данных, построение карт смещений, участие в интерпретации результатов.

Д.Ж. Акматов – подготовка исходных данных, техническое сопровождение обработки, участие в визуализации результатов.

И.В. Лосев – методическая поддержка интерферометрического анализа, проверка и верификация данных.

А.А. Камаев – анализ геодинамической обстановки, редактирование текста, участие в обсуждении полученных результатов.

Authors' contribution

R.V. Shevchuk – formulation of the scientific problem, general management of the study, scientific coordination of the team, participation in data processing and interpretation, formulation of conclusions, editing of the final text of the article.

A.I. Manevich – processing of satellite data, construction of displacement maps, participation in interpretation of results.

D.J. Akmatov – preparation of initial data, technical support of processing, participation in visualisation of results.

I.V. Losev – methodological support of interferometric analysis, data verification and validation.

A.A. Kamaev – geodynamic analyses, text editing, participation in discussion of the results.

Список литературы / References

1. Кузьмин Д.К. Моделирование смещений земной поверхности, полученных различными спутниками со встроенным модулем РСА (на примере мониторинга месторождений нефти и газа). *Проблемы недропользования*. 2021;(2):94–104. Режим доступа: <https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/469> (дата обращения: 10.05.2025).
Kuzmin D.K. Modeling of the earth's surface displacements obtained by various satellites with a built-in SAR-module (exemplified by monitoring of oil and gas fields). *Problems of Subsoil Use*. 2021;(2):94–104. (In Russ.) Available at: <https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/469> (accessed: 10.05.2025).
2. Manevich A.I., Losev I.V., Avdonina A.M., Shevchuk R.V., Kaftan V.I., Tatarinov V.N. Modeling the horizontal velocity field of the earth's crust in a regular grid from GNSS measurements. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023;23(6):ES6002. <https://doi.org/10.2205/2023es000885>
3. Kaftan V.I., Tatarinov V.N., Pobedinsky M.G., Shayakhmetov R.F., Manevich A.I., Shevchuk R.V., Losev I.V. GNSS observations at the Klimovskaya integrated geomagnetic observatory. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2024;59(8):990–1000. <https://doi.org/10.1134/S0001433823080066>
4. Hole J., Holley R., Giunta G., De Lorenzo G., Thomas A. InSAR assessment of pipeline stability using compact active transponders. In: *Proceedings of FRINGE2011, 8th International Workshop on Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry*. European Space Agency, Frascati, Italy, 19–23 September 2011. ESA SP-697; 2011, pp. 53.
5. Singhroy V., Li J., Blais-Stevens A., Fobert M.-A. Insar Monitoring of Pipeline Routes. In: *IGARSS 2018 – 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, 22–27 July 2018*. IEEE; 2018, pp. 212–215. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8517873>
6. Benetatos C., Codegone G., Ferraro C., Mantegazzi A., Rocca V., Tango G., Trillo F. Multidisciplinary analysis of ground movements: An underground gas storage case study. *Remote Sensing*. 2020;12(21):3487. <https://doi.org/10.3390/rs12213487>
7. Gee D., Sowter A., Grebby S., de Lange G., Athab A., Marsh S. National geohazards mapping in Europe: Interferometric analysis of the Netherlands. *Engineering Geology*. 2019;256:1–22. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.02.020>
8. Even M., Westerhaus M., Simon V. Complex surface displacements above the storage cavern field at Epe, NW-Germany, observed by multi-temporal SAR-interferometry. *Remote Sensing*. 2020;12(20):3348. <https://doi.org/10.3390/rs12203348>
9. Михайлов В.О., Киселева Е.А., Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П. Оценка полного вектора смещений земной поверхности и техногенных объектов по данным радарной спутниковой интерферометрии для областей разработки месторождений нефти и газа. *Геофизические исследования*. 2012;13(3):5–17. Режим доступа: <https://portal.ifz.ru/geofizicheskie-issledovaniya/soderzhanie/tom-13-nomer-3-2012/01> (дата обращения: 10.05.2025).
Mikhailov V., Kiseleva E., Dmitriev P., Golubev V., Smolyaninova E., Timoshkina E. Estimation of full vector of displacements of the earth's surface and technogenic objects based on InSAR data applied to oil and gas production areas. *Geophysical Research*. 2012;13(3):5–17. (In Russ.) Available at: <https://portal.ifz.ru/geofizicheskie-issledovaniya/soderzhanie/tom-13-nomer-3-2012/01> (accessed: 10.05.2025).
10. Grebby S., Orynbasarova E., Sowter A., Gee D., Athab A. Delineating ground deformation over the Tengiz oil field, Kazakhstan, using the Intermittent SBAS (ISBAS) DInSAR algorithm. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019;81:37–46. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.05.001>
11. Sharma J., Francioni M., Busler J., Stead D., Donati D., Onsel E. et al. Monitoring landslides in pipeline corridors using a combined satellite based InSAR and geomechanical modelling approach. In: *Proceedings of the 69th Canadian Geotechnical Society*. 2016. 10 p.
12. Ianoschi R., Schouten M., Leezenberg P.B., Dheenathayalan P., Hanssen R. Satellite radar interferometry for risk management of gas pipeline networks. In: *Proceedings of the 2013 European Space Agency Living Planet Symposium, Edinburgh, 9–13 September 2013*. ESA SP-722. Available at: https://ftp.spacecenter.dk/pub/Ioana/papers/s361_5iano.pdf (accessed: 10.05.2025).
13. Дмитриев П.Н. Новые методы обработки и интерпретации данных радарной спутниковой интерферометрии [Дис. ... канд. физ.-мат. наук]. М.; 2014. 124 с.
14. Волкова М.С. Применение спутниковой радарной интерферометрии для изучения и моделирования полей смещений на склонах вулканов полуострова Камчатка [Дис. ... канд. физ.-мат. наук]. М.; 2022. 97 с.
15. Тимофеева В.А. Применение методов РСА-интерферометрии для исследования сейсмических событий в районе полуострова Камчатка и Командорских островов [Дис. ... канд. физ.-мат. наук]. М.; 2022. 121 с.
16. Кузьмин Ю.О. Физические основы измерения смещений земной поверхности методом РСА интерферометрии и проблемы их идентификации на месторождениях углеводородного сырья (УВ). *Маркшейдерский вестник*. 2013;(5):37–44.
Kuzmin Yu.O. Physical bases of measurement of shifts of a terrestrial surface the RSA method of an interferometry and a problem of their identification on fields of hydrocarbonic raw materials (UV). *Mine Surveying Bulletin*. 2013;(5):37–44. (In Russ.)
17. Волкова Е.Н. Прикаспийская впадина и ее отображение в геофизических аномалиях. *Успехи современного естествознания*. 2019;(12-2):254–259. Режим доступа: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37298> (дата обращения: 10.05.2025).
Volkova E.N. Cis-Caspian depression and its reflection in geophysical anomalies. *Advances in Current Natural Sciences*. 2019;(12-2):254–259. (In Russ.) Available at: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37298> (accessed: 10.05.2025).
18. Огаджанов В.А., Огаджанов А.В., Маслова М.Ю. О цикличности в проявлениях локальной сейсмичности в районе саратовского геодинамического полигона. *Недра Поволжья и Прикаспия*. 2013;(76):52–57.
Ogadzhanov V.A., Ogadzhanov A.V., Maslova M.Yu. On repeating patterns in manifestations of local seismicity in the Saratov geodynamic test area. *Volga and Pricaspian Region Resources*. 2013;(76):52–57. (In Russ.)

19. Дружинин В.С., Начапкин Н.И., Осипов В.Ю. Прикаспийская впадина – пограничная мегаструктура континентальной коры (на примере анализа глубинной информации по ее восточному сегменту). *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2019;(5):42–50. [https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-5\(329\)-42-50](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-5(329)-42-50)
Druzhinin V.S., Nachapkin N.I., Osipov V.Yu. Pre-Caspian depression - frontier megastructure of continental crust (on example of analysis depth information its eastern segment). *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2019;(5):42–50. (In Russ.) [https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-5\(329\)-42-50](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-5(329)-42-50)
20. Акматов Д.Ж., Николайчук В.В., Тихонов А.А., Шевчук Р.В. Радарная интерферометрия как дополнение к классическим методам наблюдений за движением земной поверхности. *Горная промышленность*. 2020;(1):144–147. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-144-147>
Akmatov D.Zh., Nikolaichuk V.V., Tikhonov A.A., Shevchuk R.V. Radar interferometry as supplement to classical methods to observe earth's surface displacement. *Russian Mining Industry*. 2020;(1):144–147. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-144-147>

Информация об авторах

Шевчук Роман Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Лаборатории геодинамики Геофизического центра Российской академии наук, г. Москва, ассистент кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-3461-6383>; e-mail: Shevchuk.002@mail.ru

Маневич Александр Ильич – научный сотрудник Лаборатории геодинамики Геофизического центра Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; старший преподаватель кафедры безопасности и экологии горного производства, старший преподаватель кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: a.manevich@gcras.ru

Лосев Илья Владимирович – научный сотрудник Лаборатории геодинамики Геофизического центра Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; ведущий инженер кафедры безопасности и экологии горного производства Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0005-0785-4986>; e-mail: i.losev@gcras.ru

Акматов Дастан Женишбекович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Лаборатории геодинамики Геофизического центра Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; ассистент кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-6435-464X>; e-mail: d.akmatov@gcras.ru

Камаев Артем Анатольевич – младший научный сотрудник Лаборатории геоинформатики и больших данных Арктики Геофизического центра Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0008-5139-8086>; e-mail: artemkakamaev@gmail.com

Information about the authors

Roman V. Shevchuk – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Laboratory of Geodynamics, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; Assistant at the Department of Geology and Surveying, Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-3461-6383>; e-mail: Shevchuk.002@mail.ru

Alexander I. Manevich – Researcher at the Laboratory of Geodynamics, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; Senior Lecturer at the Department of Mining Safety and Ecology and Senior Lecturer at the Department of Geology and Surveying, Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: a.manevich@gcras.ru

Ilya V. Losev – Researcher at the Laboratory of Geodynamics, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; Lead Engineer at the Department of Mining Safety and Ecology, Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0005-0785-4986>; e-mail: i.losev@gcras.ru

Dastan Zh. Akmatov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, at the Laboratory of Geodynamics, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; Assistant at the Department of Geology and Surveying, Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-6435-464X>; e-mail: d.akmatov@gcras.ru

Artem A. Kamaev – Junior Researcher at the Laboratory of Geoinformatics and the Arctic Big Data, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; Postgraduate Student at the Department of Geology and Surveying, Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0008-5139-8086>; e-mail: artemkakamaev@gmail.com

Article info

Received: 02.09.2025

Revised: 23.10.2025

Accepted: 31.10.2025

Информация о статье

Поступила в редакцию: 02.09.2025

Поступила после рецензирования: 23.10.2025

Принята к публикации: 31.10.2025