

СТАТЬЯ

УДК 528.8.044.2:528.481
DOI 10.17513/use.38542



CC BY 4.0

МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВДОЛЬ ОРОСИТЕЛЬНОГО КАНАЛА МЕТОДОМ ВРЕМЕННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Чжан Х. ORCID ID 0009-0001-6661-3606,

Кузнецов Э. Д. ORCID ID 0000-0002-9760-0242, Хань Ц.

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,
Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: eduard.kuznetsov@urfu.ru*

Оседание земной поверхности является опасным геологическим процессом, вызываемым комплексом природных и антропогенных факторов. Спутниковая радиоинтерферометрия является одним из важнейших инструментов дистанционного зондирования благодаря всепогодности, независимости от времени суток, высокой проникающей способности и широкому охвату. Цель исследования – анализ динамики оседаний поверхности вблизи оросительных каналов, питающихся от притоков р. Хуанхэ на территории г. Цзююань (Китай) в период с января 2023 г. по март 2025 г. Проведена обработка 59 радарных снимков, полученных спутником Sentinel-1A. С помощью метода спутниковой радиолокационной интерферометрии на основе малых базовых линий выполнен мониторинг оседания поверхности для вычисления скоростей и накопленного оседания земной поверхности вблизи оросительных каналов. Для верификации полученных оценок оседания земной поверхности использованы полевой мониторинг и результаты применения технологии радиолокационной интерферометрии с постоянными отражателями. Выявлен неравномерный характер оседания поверхности в буферной зоне каналов. Основные очаги деформаций расположены в районах населенных пунктов Мочжуан и Гэжэньчжуан. Максимальные значения оседаний наблюдаются в районах, пространственное распределение которых согласуется с гипотезой о возможном влиянии горных работ; максимальное накопленное оседание, зафиксированное по данным SBAS-InSAR, составило -165 мм (по данным геометрического нивелирования – -175 мм). Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего мониторинга состояния линейных гидротехнических объектов и оценки возможного влияния угледобывающей деятельности на оседание поверхности. Исследование демонстрирует эффективность применения технологии InSAR для мониторинга оседания земной поверхности вдоль протяженных инженерных объектов.

Ключевые слова: мониторинг оседания поверхности, накопленное оседание, радиоинтерферометрия, линейные гидротехнические объекты, верификация

MONITORING OF GROUND SURFACE DEFORMATIONS ALONG AN IRRIGATION CANAL USING TIME-DOMAIN RADAR INTERFEROMETRY

Zhang Kh. ORCID ID 0009-0001-6661-3606,

Kuznetsov E. D. ORCID ID 0000-0002-9760-0242, Khan Ts.

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin”,
Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: eduard.kuznetsov@urfu.ru*

Land subsidence is a dangerous geological process caused by a combination of natural and anthropogenic factors. Satellite radio interferometry is one of the most important remote sensing tools due to its all-weather, day/night independence, high penetrating power, and wide coverage. Aims. To analyze the dynamics of surface displacements near irrigation canals fed by tributaries of the Yellow River in Jiyuan City, China, from January 2023 to March 2025. We processed 59 Sentinel-1A satellite images. Employing the Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar algorithm, the study maps out the velocities and cumulative surface subsidence deformation adjacent to critical water supply channels sourced from the Yellow River tributaries. We used Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar technology and field monitoring to support verification of the Earth's surface deformation results. The findings reveal highly uneven subsidence patterns across the monitored area. Two prominent deformation hotspots were identified, clustered primarily around the settlements of Mozhuang and Gezhenzhuang. The maximum deformation values were observed in areas where the spatial distribution of deformation is consistent with the hypothesis of a possible influence of mining activities, with the maximum cumulative subsidence recorded by SBAS-InSAR data was -165 mm (-175 mm according to geodetic leveling data). The results can provide valuable information for continuous monitoring of linear hydraulic engineering structures and for assessing the potential impact of coal mining activities on surface deformation. This study demonstrates the effectiveness of InSAR technology for monitoring surface deformation along long linear engineering structures.

Keywords: ground subsidence monitoring, cumulative surface subsidence, radar interferometry, verification, linear hydraulic structures

Введение

Оседание земной поверхности является опасным геологическим процессом, который провоцируется комплексом природных и антропогенных факторов, приводя к понижению высотных отметок местности [1]. Данное явление трудно поддается оперативному обнаружению, носит зачастую необратимый характер и влечет за собой масштабные риски, включая невосполнимые экологические потери, угрозу безопасности населения и разрушение городской инфраструктуры. Деформации рельефа напрямую зависят от интенсивности хозяйственной деятельности: урбанизации, активного извлечения углеводородов и подземных вод, добычи полезных ископаемых, а также строительства подземных транспортных сетей [2]. Эти процессы спровоцировали критические оседания поверхности во множестве китайских мегаполисов и провинций [3].

По статистическим данным, свыше 100 городов и регионов КНР страдают от оседания грунтов, при этом наиболее сложная ситуация наблюдается на Великой Китайской равнине, в дельте р. Янцзы и бассейне р. Фэнхэ [4]. Прямой экономический ущерб от этих катастроф оценивается в десятки миллиардов юаней ежегодно. Территории среднего и нижнего течения р. Хуанхэ, расположенные на Великой Китайской равнине, демонстрируют одни из самых высоких темпов оседания поверхности в стране. Подобные оседания грунта способны инициировать образование карстовых воронок, провалов, оползней и глубоких трещин [5].

За последние годы активная разработка угольных месторождений вблизи сельскохозяйственных водотоков привела к локальным оседаниям, что вызывает регулярные повреждения гидротехнической инфраструктуры каналов и огромные экономические потери [6]. В связи с этим возникает острая необходимость в организации долгосрочного и непрерывного мониторинга деформаций вокруг ирригационных объектов для получения точных данных о динамике процесса, его пространственном распределении и причинах возникновения.

Исторически для мониторинга деформаций земной поверхности широко применялись классические геодезические методы, включая нивелирование и ГНСС-измерения. Они обеспечивают высокую точность локальных наблюдений, однако требуют проведения наземных измерений и имеют ограниченный пространственный охват. Поэтому космическая радиолокационная

интерферометрия может использоваться как дополнительный инструмент комплексного деформационного мониторинга горных территорий [7].

Спутниковая интерферометрия на основе съемки с помощью радара с синтезированной апертурой (InSAR) стала важнейшим инструментом дистанционного зондирования благодаря своей всепогодности, независимости от времени суток, высокой проникающей способности и широкому охвату. Тем не менее классический метод InSAR подвержен ошибкам из-за атмосферных искажений и пространственно-временной декорреляции. Для преодоления этих ограничений при анализе длительных временных рядов были разработаны специализированные алгоритмы: PS-InSAR, SBAS-InSAR [8, 9].

В методе SBAS-InSAR формируется сеть интерферограмм на основе комбинаций снимков с минимальными пространственными и временными базами. За счет пространственной фильтрации фазы и анализа средней когерентности выделяются медленно декоррелирующие пиксели (SDFP), сохраняющие стабильность фазы на коротких интервалах. Использование пикселей SDFP позволяет компенсировать погрешности цифровой модели рельефа (DEM) и атмосферные шумы, обеспечивая расчет высокоточных полей деформаций на значительных территориях. Методики многовременной радиолокационной интерферометрии применяются для мониторинга оседаний земной поверхности, в том числе в районах горных работ и на территориях, подверженных различным геодинамическим процессам [10, 11].

Цель исследования – мониторинг оседаний поверхности вблизи ирригационных каналов, питающихся от притоков р. Хуанхэ на территории г. Цзиюань (Китай), по радиолокационным изображениям, полученным спутником Sentinel-1A в интерферометрическом режиме съемки в период с января 2023 г. по март 2025 г.

Материалы и методы исследования

Алгоритм SBAS-InSAR был первоначально предложен Berardino и соавт. [8] и впоследствии развит в работах Lanari и соавт. [9]. Суть метода заключается в комбинировании SAR-снимков для формирования избыточной сети пар с короткими пространственными и временными базами линиями. Это минимизирует изолированность кластеров данных и повышает частоту временной дискретизации. Для пре-

одоления проблемы вырожденности матриц применяется метод сингулярного разложения (SVD), позволяющий найти решение системы линейных уравнений по критерию наименьших квадратов и восстановить хронологию скоростей оседаний за весь период наблюдений.

Из набора $N + 1$ радарных изображений исследуемой территории, полученных в моменты времени $t_0, t_1, \dots, t_N$, выбирается единое главное изображение, с которым совмещаются все остальные сцены. На основе этих данных синтезируется M дифференциальных интерферограмм, количество которых ограничивается условием

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq \frac{N(N+1)}{2}.$$

Для интерферограммы с индексом i , образованной парой снимков за даты t_a и t_b ($t_b > t_a$), после исключения топографической фазы и фазы плоской Земли, разность фаз в координатах азимута x и наклонной дальности r описывается выражением

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_i(x, r) &= \varphi(t_b, x, r) - \varphi(t_a, x, r) = \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_b, x, r) - d(t_a, x, r)], \end{aligned}$$

где λ – длина волны радара; $d(t_b, x, r)$ и $d(t_a, x, r)$ – суммарные накопленные оседания вдоль линии визирования (LOS) на моменты t_b и t_a относительно начальной эпохи t_0 ; $\varphi(t_b, x, r)$ и $\varphi(t_a, x, r)$ – соответствующие фазовые вклады деформаций.

Средняя скорость оседания поверхности, получаемая на основе измерения разности фаз между двумя пролетами спутника, равна

$$v_i = \frac{\varphi(t_b, x, r) - \varphi(t_a, x, r)}{t_b - t_a}.$$

Интерферометрическую фазу i -й интерферограммы можно представить в виде интегральной суммы от скорости оседания поверхности:

$$\sum_{k=a}^{b-1} (t_{k+1} - t_k) v_k = \delta\varphi_i.$$

Запишем приведенное выше уравнение в матрично-векторной форме:

$$Av = \delta\varphi.$$

где A – топологическая матрица размером $M \times N$, а $\delta\varphi$ – вектор развернутых фаз M

интерферограмм. В случае единого связанного графа ($M \geq N$) ранг матрицы равен N , и система решается классическим методом наименьших квадратов. При наличии разрывов в графе ($M < N$) применяется SVD-разложение для поиска решения с минимальной нормой вектора скоростей. Последующее интегрирование этих скоростей позволяет получить кумулятивные оседания для каждой временной эпохи [12].

Основы метода PS-InSAR. Используется несколько одновидовых SAR-снимков, покрывающих одну и ту же исследуемую территорию. Среди снимков выбирается один основной, с которым совмещаются все остальные SAR-снимки. Для временной последовательности SAR-снимков выполняется анализ стабильности амплитудных и/или фазовых характеристик пикселей и выбираются цели – постоянные отражатели (Persistent Scatterer, PS). После интерферометрической обработки и удаления топографического эффекта получается дифференциальная интерферометрическая фаза для целей – постоянных отражателей, и затем выполняется повторное дифференцирование дифференциальной интерферометрической фазы соседних целей – постоянных отражателей. Далее, исходя из различных характеристик фазовых компонент после двойного дифференцирования, строится модель фазы деформации с применением методов пространственно-временной фильтрации для оценки параметров деформации и остаточных ошибок рельефа [13].

Технология PS-InSAR не выполняет обработку данных для всех пикселей на снимках SAR, а выбирает в качестве объектов наблюдения точки PS, которые характеризуются относительно стабильными рассеивающими свойствами во времени и сильными эхо-сигналами [14].

Результаты обработки PS-точек могут служить ориентиром для выбора наземных контрольных точек (GCP) при коррекции орбит в процессе SBAS, тем самым позволяя выбирать стабильные участки.

Обзор источников SAR-данных и районов исследования

Миссия Sentinel-1, реализуемая Европейским космическим агентством (ЕКА) в рамках программы Copernicus, предоставляет данные высокого разрешения с различными углами падения и вариантами поляризации. Спутник Sentinel-1 обеспечивает широкий пространственный охват территории исследования; для рассматриваемых

данных использовался режим TOPS (Terrain Observation with Progressive Scans) [15]. В данной работе используется 59 SLC-снимков, полученных спутником Sentinel-1A (режим съемки IW, поляризация VV, восходящий виток) в интерферометрическом режиме съемки за период с января 2023 г. по март 2025 г. (в среднем по две сцены ежемесячно). Для устранения орбитальных погрешностей применялись файлы точных эфемерид (POD) от ЕКА с сантиметровой точностью. Топографическая фаза моделировалась и вычиталась на основе цифровой модели рельефа SRTM (разрешение 30 м) [16], имеющей точность по высоте порядка 16 м. Для обработки данных в работе использовалось специализированное программное обеспечение ENVI v.5.6.3 с модулем интерферометрической обработки SARscape v.5.6.2.

Исследуемый район расположен в пограничной зоне между уездом Янчэн (кит. 阳城县, англ. Yangcheng County), входящим в состав городского округа Цзиньчэн провинции Шаньси, и городским округом Цзююань (кит. 济源市, англ. Jiyuan City) (провинция Хэнань). Территория локализована на юго-востоке провинции Шаньси, в предгорьях хребтов Тайханшань и Тайюэшань, в бассейне реки Циньхэ (приток первого порядка р. Хуанхэ). Географические координаты района исследований: 112°25'–112°45' в. д. и 35°05'–35°20' с. ш. Общая площадь

района составляет около 1968 км², из которых порядка 30 % отведены под пахотные угодья, орошаемые за счет притоков Хуанхэ. Эффективность сельского хозяйства напрямую зависит от развитой сети водоканалов (рис. 1). Регион обладает богатыми залежами полезных ископаемых. В районах подземной добычи угля наблюдение за оседанием земной поверхности имеет особое значение с точки зрения оценки потенциальных рисков для объектов инфраструктуры [17].

Обработка данных

Обработка радарных данных Sentinel-1 методом SBAS-InSAR для расчета оседаний грунта в округе Цзююань за 2023–2025 гг. проводилась в несколько этапов.

Шаг 1. Пространственное кадрирование: чтобы снизить вычислительную нагрузку, исходные SLC-кадры были обрезаны строго по границам зоны интереса.

Шаг 2. Формирование интерферометрических пар: В качестве мастер-снимка использовалась сцена от 30 января 2024 г. При формировании интерферометрических пар максимальная временная база составляла 120 дней, а перпендикулярная пространственная база ограничивалась 150 м с дополнительным порогом 2 % от критической базовой линии. В результате были сформированы 194 интерферометрические пары.

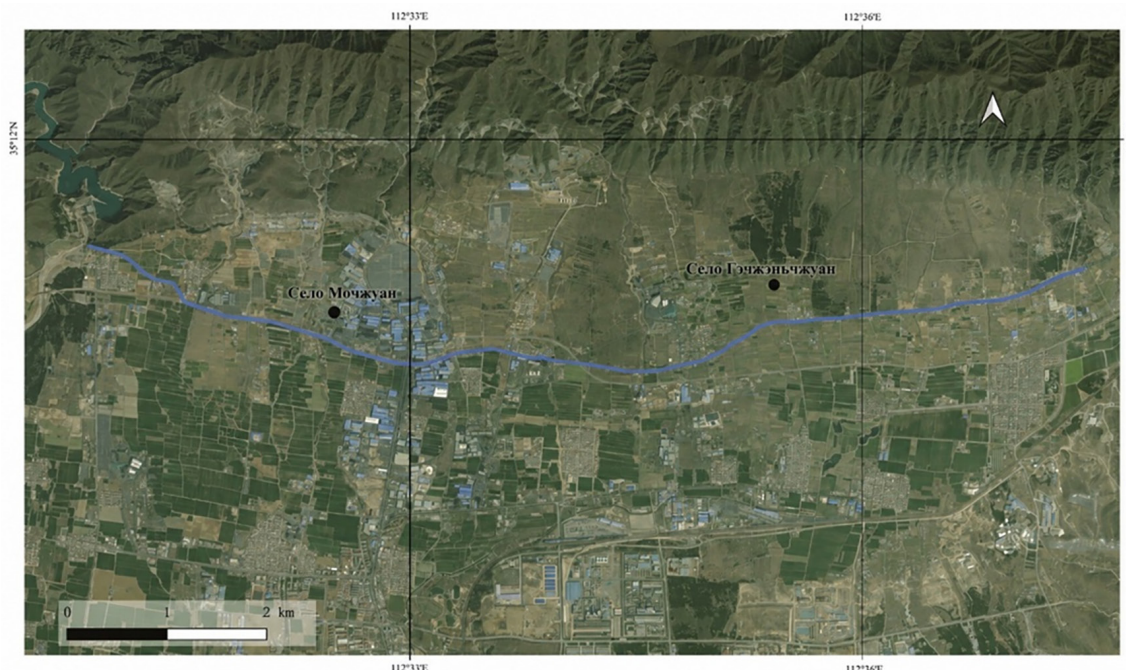


Рис. 1. Спутниковое изображение исследуемого района. Синей линией показан канал
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Шаг 3. Интерферометрия: Проведено субпиксельное совмещение изображений. Топографическая составляющая фазы исключена с использованием 30-метровой ЦМР SRTM v3 [16]. После компенсации плоской фазы по эфемеридам был применен фильтр Гольдштейна для подавления спекл-шума. Фазовая развертка реализовывалась алгоритмом минимальной стоимости потока (MCF) с порогом когерентности 0.2.

Шаг 4. Для устранения остаточных фазовых трендов использовалась относительно стабильная референсная область, выбранная за пределами основных зон деформации и участков горных работ.

Шаг 5. Инверсия деформаций: Выполнен расчет линейных скоростей оседаний и коррекция ошибок ЦМР методом наименьших квадратов. Атмосферная задержка нивелировалась пространственным (окно 1600 м) и временным (окно 365 дней) фильтрованием.

Шаг 6. Геокодирование: Финальные деформации вдоль линии визирования (LOS) были преобразованы из радарной геометрии в систему координат WGS 84 / UTM Zone 49N с пространственным разрешением 15 м.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ оседания грунта в районе исследования

С помощью метода PS-InSAR построена цветокодированная карта среднегодовых вертикальных скоростей оседания поверхности вдоль оросительного канала за период с января 2023 г. по март 2025 г. (рис. 2). Поскольку скорость оседания в целевой области превышает предел обнаружения InSAR (например, величина оседания составляет более половины длины волны радара в течение цикла выборки), когерентность снижается, что приводит к «исчезновению» точек PS в зонах наиболее интенсивных оседаний. Поэтому результаты технологии PS-InSAR позволяют выявить две зоны оседания, однако они не являются наглядными и служат лишь в качестве ориентира и вспомогательной проверки для результатов технологии SBAS-InSAR.

Карта среднегодовых вертикальных скоростей оседания поверхности вдоль ирригационного канала за период с января 2023 г. по март 2025 г., построенная в результате применения алгоритма SBAS-InSAR, приведена на рис. 3.

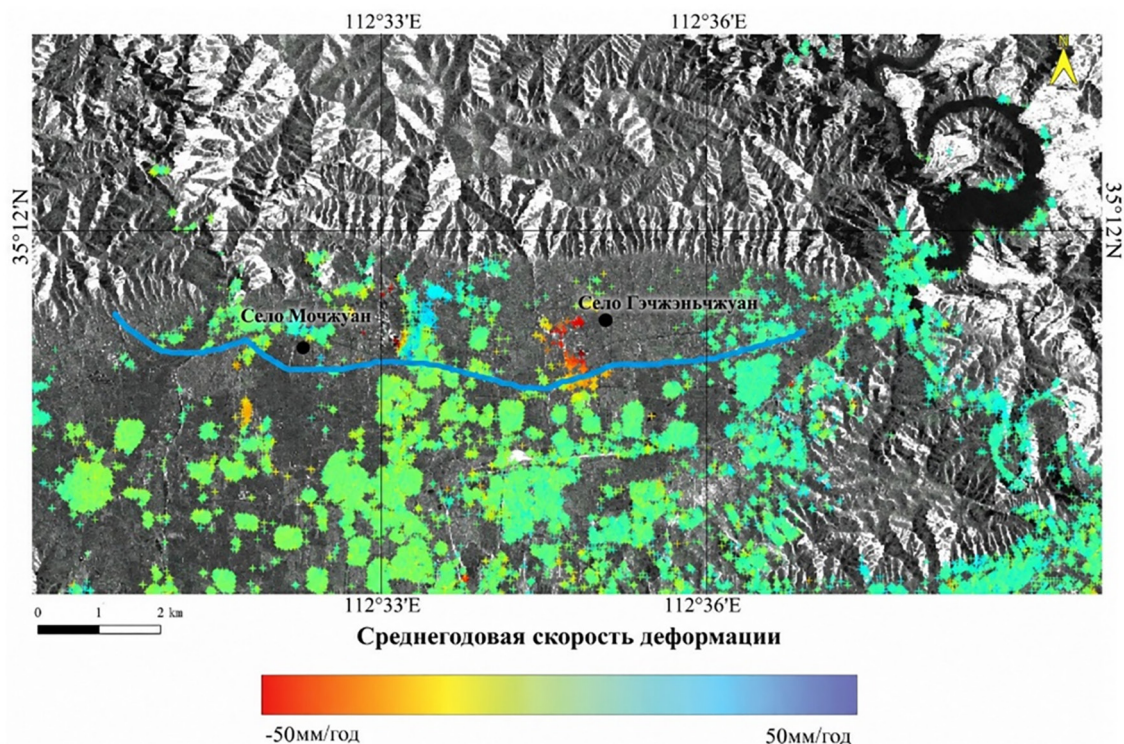


Рис. 2. Среднегодовая скорость деформации земной поверхности в исследуемом районе на основе технологии PS-InSAR
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

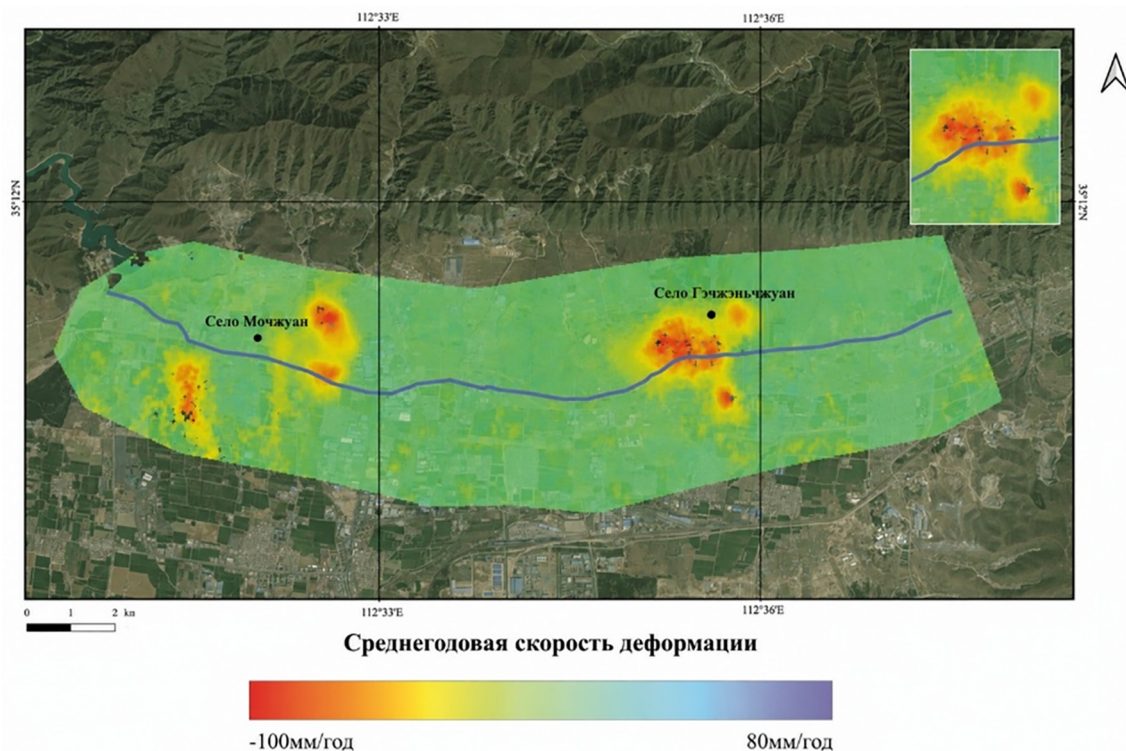


Рис. 3. Среднегодовая скорость деформации поверхности в исследуемом районе, по данным SBAS-InSAR

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Скорости деформации варьируются в диапазоне от -100 мм/год (оседание) до +80 мм/год (поднятие). Красные и желтые пиксели соответствуют участкам критических оседаний поверхности, зелеными пикселями показан устойчивый рельеф, сине-фиолетовыми – локальные возвышения.

Пространственный анализ выявил две ключевые аномальные зоны:

1. Западный сектор (окрестности с. Мочжуан, 磨庄, Mozhuang Village, координаты 35°11' N, 112°32' E), который характеризуется умеренной, но системной динамикой оседания грунтов.

2. Восточный сектор (район с. Гэчжэньчжуан, 圪针庄, Gezhenzhuang Village, координаты 35°11' N, 112°35' E), демонстрирующий экстремальное оседание, скорость которого достигает -100 мм/год.

Сопоставление полученных карт с полевыми данными подтверждает, что эпицентры деформаций совпадают с контурами шахтных полей. Полученные результаты пространственного распределения согласуются с гипотезой о влиянии подземных горных работ: выемка угольных пластов приводит к перераспределению горного давления и последующему оседанию пере-

крывающих пород. Образование подземных полостей техногенного/природного происхождения (генезис не устанавливался) провоцирует пролонгированные оседания слоев. Остальная территория (зеленые тона) остается стабильной, если не считать отдельных участков поднятий, обусловленных геоморфологическими причинами. Такая картина делает необходимым непрерывный геодинамический мониторинг канала, чтобы избежать повреждения инфраструктуры.

Анализ временного ряда деформаций в западном районе (вблизи с. Мочжуан)

Чтобы оценить кинематику процесса в северо-западном очаге (в районе с. Мочжуан), была выбрана характерная точка и выполнен анализ ее оседаний, полученных с использованием геометрического нивелирования и по данным SBAS-InSAR и PS-InSAR (рис. 4). Для пространственной привязки временных серий деформаций использованы точные координаты контрольной точки: по данным SBAS-InSAR (35.18322° N, 112.56197° E), PS-InSAR (35.18323° N, 112.56197° E) и данным геометрического нивелирования (35.18000° N, 112.56000° E).

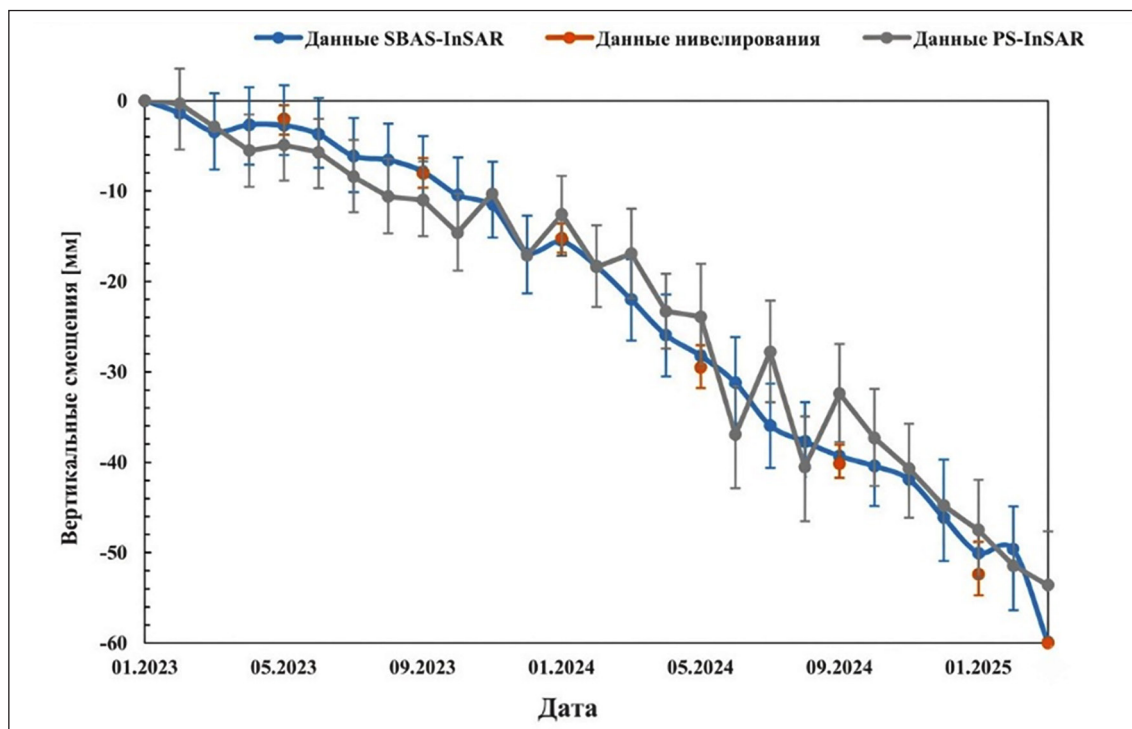


Рис. 4. Анализ изменения высот характерных точек в западном районе (вблизи с. Мочжуан) оседания поверхности

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Незначительное пространственное расхождение между точкой нивелирования и радарными точками обусловлено расположением реперов государственного геодезического пункта. Среднеквадратическая погрешность (σ) для результатов радарной интерферометрии оценивается на основе некогерентного шума и остаточных атмосферных помех: для технологии SBAS-InSAR типичная точность определения вертикальных оседаний в условиях горных районов и зон активных деформаций составляет порядка ± 5 мм, для PS-InSAR – около ± 6 мм. Для высокоточного геометрического нивелирования II класса погрешность определения высот не превышает ± 2 мм. Графики на рис. 4 отражают накопленное оседание за 2023–2025 гг. Данные SBAS-InSAR сравниваются с результатами геометрического нивелирования и PS-InSAR. Сопоставление показало высокую сходимость радиолокационных и наземных геодезических измерений, что свидетельствует о надежности спутникового подхода.

В данной точке наблюдается устойчивое оседание поверхности. Накопленное оседание превысило 65 мм, при этом скорость оседания поверхности со временем изменялась. Наиболее резкий скачок за-

фиксирован между сентябрем 2023 г. и сентябрем 2024 г., что пространственно совпадает с зонами интенсивной подземной добычи. Пространственная корреляция между границами горных отводов и контурами мульды сдвижения согласуется с гипотезой о техногенном характере происходящих оседаний. Прямая пространственная связь между горноотводами и контурами мульды сдвижения предположительно указывает на техногенный фактор оседаний. Эти риски диктуют необходимость упреждающих инженерных мероприятий для защиты поселений и канала.

Анализ временного ряда деформаций в восточном районе (вблизи с. Гэчжэньчжуан)

Аналогичный хронологический анализ был проведен для маркерной точки в центрально-восточной части (район с. Гэчжэньчжуан), где зафиксирован наиболее опасный очаг (рис. 5). Пространственная привязка используемых временных серий выполнена по следующим географическим координатам: SBAS-InSAR (35.18346° N, 112.59223° E), PS-InSAR (35.18346° N, 112.59222° E) и данным геометрического нивелирования (35.18000° N, 112.59000° E).

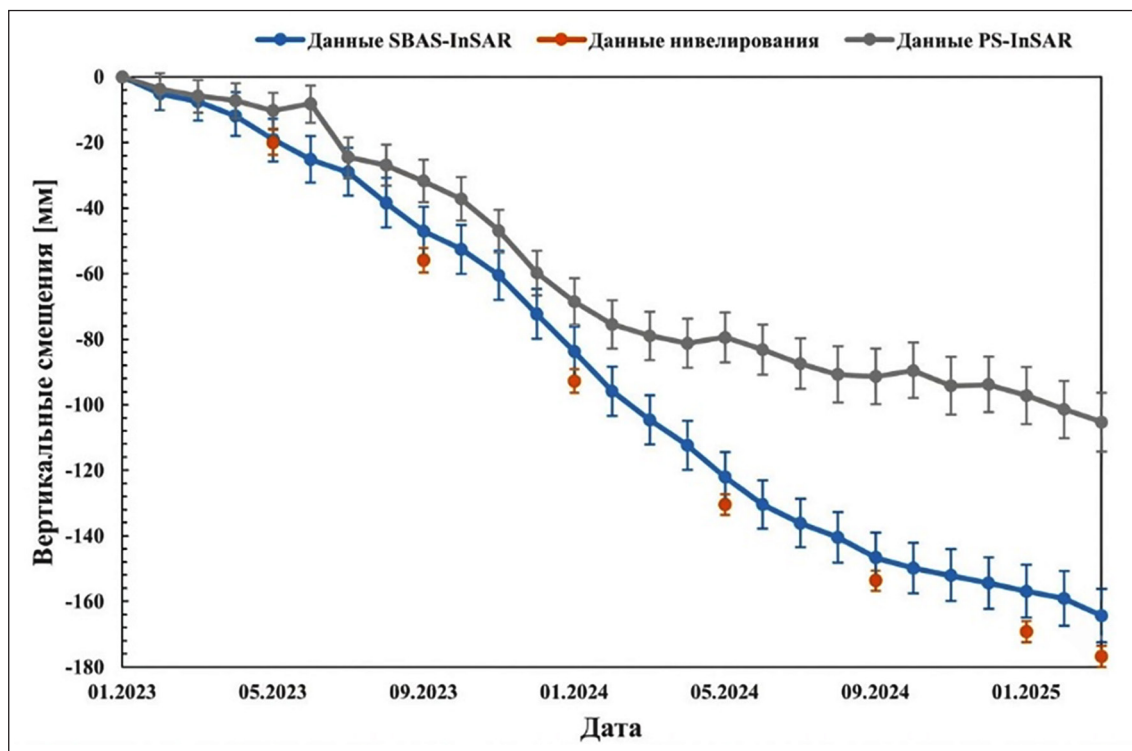


Рис. 5. Анализ изменения высоты характерной точки в центрально-восточном районе (вблизи с. Гэчжэньчжуан) оседания поверхности
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Небольшое удаление геодезического репера нивелирования от интерферометрических точек (~440 м) обусловлено фактической сеткой расположения реперов. Анализ графиков на рис. 5 показывает, что значения оседания по данным PS-InSAR значительно меньше по абсолютной величине по сравнению с данными SBAS-InSAR и данными геометрического нивелирования. Технология PS-InSAR опирается исключительно на постоянные рассеиватели (PS-точки), которые, как правило, относятся к стабильным объектам (здания, выходы скальных пород и т. п.) и могут не отражать полной величины деформации, особенно в зонах интенсивного оседания. На участках с наибольшими скоростями деформаций PS-точки часто теряются из-за декорреляции, что ведет к занижению оценок оседания поверхности. SBAS-InSAR, напротив, задействует более плотную пиксельную сетку, включая некогерентные области, и дает картину, лучше согласующуюся с реальными деформациями, что подтверждается результатами нивелирования.

Максимальное накопленное оседание, зафиксированное по данным SBAS-InSAR, составило -165 мм (по данным геодезиче-

ского нивелирования – -175 мм). Для оценки точности результатов учитывались характерные неопределенности применяемых методов: около ± 5 мм для SBAS-InSAR, ± 6 мм для PS-InSAR и ± 2 мм для геометрического нивелирования. Подобная равномерность оседаний характерна для продолжительного и устойчивого техногенного давления. Пространственная близость действующих угольных шахт согласуется с гипотезой об оседании поверхности в результате прогиба вышележащей толщи пород под влиянием подземной добычи. В непосредственной близости от гидротехнических коммуникаций и жилой застройки такие скорости оседаний представляют критическую опасность. В связи с этим зона в окрестности с. Гэчжэньчжуан нуждается в постоянном мониторинге и оперативной оценке структурных рисков.

Применение SBAS-InSAR для исследования бассейна притоков р. Хуанхэ в границах округа Цзюань показало, что эта технология пригодна для высокоточного пространственного анализа движений земной коры. Использование сингулярного разложения (SVD) позволило успешно справиться с разрывами интерферометрических

связей и корректно рассчитать скорости оседаний на основе принципа минимальной нормы. Полученные карты мульд сдвижения хорошо согласуются с геологическими и техногенными условиями провинции.

Анализ маркерных пикселей показал, что среднегодовые скорости оседания составляют от 30 до 100 мм/год. Согласно нормативным требованиям (например, «Спецификации по оценке риска геологических опасностей» Министерства природных ресурсов КНР, http://www.cigem.cgs.gov.cn/tzgg_4890/201806/W020180605531374031168.pdf), территории со скоростью оседания поверхности более 20 мм/год относятся к зоне повышенного риска и требуют стабилизационных мер. Спутниковые измерения и материалы наземных съемок дают согласованные оценки оседаний. Обнаруженные оседания являются следствием деятельности угольных шахт.

При изучении быстрых и интенсивных оседаний технология PS-InSAR уступает SBAS-InSAR по нескольким параметрам. Прежде всего, PS-InSAR привязан к одному мастер-снимку, и при высоких скоростях оседания поверхности сигнал теряет когерентность, развертка фазы срывается, а точные измерения становятся невозможными; SBAS-InSAR, напротив, использует пары с малыми разностями по времени и уверенно фиксирует даже быстрые изменения. Далее, PS-InSAR опирается исключительно на стабильные жесткие объекты – здания, элементы инфраструктуры, – из-за чего на открытых участках максимальных оседаний поверхности (шахтные поля, карьеры, поля) образуются «слепые зоны»; SBAS-InSAR в этих местах работает непосредственно по грунту и обеспечивает высокую плотность данных. Наконец, алгоритм PS-InSAR ориентирован на выделение линейных трендов и часто отбрасывает резкие скачкообразные провалы как шум, тогда как SBAS-InSAR способен восстанавливать нелинейный характер деформаций, что делает его незаменимым инструментом при анализе сложных геодинамических процессов на горнопромышленных территориях.

Перспективным направлением будущих изысканий является расчет 3D-векторов деформаций, включая горизонтальные компоненты оседания грунтов. Также следует отметить, что во всех современных пакетах обработки SAR-данных остаются нерешенными вопросы, связанные со специфическими фазовыми скачками при развертке и артефактами ЦМР. Дальнейшая модер-

низация алгоритмической базы позволит еще точнее реконструировать геодинамику сложных территорий.

Ограничения исследования. Несмотря на высокую эффективность методов временной радиолокационной интерферометрии (SBAS-InSAR и PS-InSAR) для мониторинга оседаний земной поверхности, полученные результаты имеют ряд ограничений, связанных с особенностями дистанционного зондирования и характеристиками исходных данных.

Во-первых, точность определения деформаций методом InSAR зависит от уровня пространственно-временной когерентности радарных изображений. В районах с интенсивными деформациями, изменением поверхности, растительным покровом или антропогенным воздействием может происходить потеря когерентности, что приводит к уменьшению количества надежных интерферометрических точек и снижению точности оценки оседаний. Особенно это актуально для зон активного оседания, где высокие скорости деформаций могут превышать пределы устойчивого фазового измерения.

Во-вторых, получаемые методом InSAR оседания первоначально определяются в направлении линии визирования спутника (Line of Sight, LOS). Поэтому преобразование LOS-смещений в вертикальные перемещения поверхности содержат ошибки, обусловленные геометрией наблюдений и возможным наличием горизонтальных компонентов движения. В настоящем исследовании основное внимание уделено вертикальным деформациям, поскольку исследуемый процесс оседания поверхности преимущественно имеет вертикальный характер, однако влияние горизонтальных перемещений полностью исключить невозможно.

В-третьих, точность результатов зависит от качества цифровой модели рельефа, используемой при интерферометрической обработке. Ошибки ЦМР могут вызывать остаточные фазовые компоненты и влиять на оценку величины оседаний, особенно в районах со сложным рельефом. Для минимизации данного влияния применялись методы пространственно-временной фильтрации и оценки остаточных фазовых ошибок в процессе обработки SBAS-InSAR.

Кроме того, на результаты InSAR могут оказывать влияние атмосферные задержки, связанные с изменением температуры, влажности и давления в атмосфере. Несмотря на применение методов пространственно-временной фильтрации, полностью

исключить атмосферные эффекты невозможно, что может приводить к появлению локальных остаточных деформационных сигналов.

Наконец, независимая наземная проверка результатов ограничена количеством доступных геодезических измерений. В связи с отсутствием плотной сети наземного мониторинга оценка точности результатов основана на сравнении отдельных контрольных точек SBAS-InSAR, PS-InSAR и геометрического нивелирования. В дальнейшем увеличение количества наземных контрольных измерений и интеграция различных методов мониторинга позволят повысить надежность оценки процессов оседания поверхности.

Таким образом, результаты исследования следует рассматривать с учетом указанных ограничений. Несмотря на существующие источники неопределенности, пространственно-временное распределение выявленных зон оседания и согласованность результатов, получаемых различными методами, позволяют использовать технологию SBAS-InSAR для эффективного мониторинга деформаций поверхности вдоль линейных гидротехнических объектов.

В настоящем исследовании отсутствуют достаточно полные временные ряды уровня грунтовых вод, осадков и детальные геологические данные, поэтому количественная оценка их вклада в формирование деформаций не проводилась. Возможное влияние тектонических нарушений также не исключается и требует отдельного геолого-геофизического анализа.

Заключение

Исследование выявило неоднородное пространственное распределение оседаний земной поверхности в районе исследуемого оросительного канала. Наиболее выраженные зоны вертикальных оседаний расположены вблизи населенных пунктов Мочжуан и Гэчжэньжуан. Максимальное накопленное оседание, зафиксированное по данным SBAS-InSAR, составило -165 мм (по данным геометрического нивелирования – -175 мм).

Пространственное совпадение зон интенсивных оседаний с контурами угольных выработок согласуется с гипотезой о возможном влиянии подземной добычи угля на динамику земной поверхности. Вместе с тем детализированные временные данные о динамике горных работ в настоящем исследовании отсутствуют, поэтому

временная корреляция между интенсивностью добычи и изменением деформаций не устанавливалась.

Другие факторы, включая изменения уровня грунтовых вод, атмосферные осадки, инженерно-геологические условия и другие природные процессы, также могут влиять на динамику деформаций, однако их индивидуальный вклад в рамках настоящего исследования количественно не оценивался.

Выявленные деформационные аномалии являются основанием для проведения детального инженерного обследования участка канала и продолжения систематического мониторинга.

Полученные результаты демонстрируют возможность эффективного применения метода SBAS-InSAR для мониторинга деформаций земной поверхности вдоль линейных гидротехнических объектов.

Список литературы

1. Смольянинова Е. И., Михайлов В. О., Дмитриев П. Н. Интерактивная карта активных оползневых участков и зон проседания грунтов для Центрального и Адлерского районов Большого Сочи по данным спутниковой радарной интерферометрии за 2015–2021 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 141–149. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-141-149.
2. Zheng M., Deng K., Fan H., Du S. Monitoring and analysis of surface deformation in mining area based on InSAR and GRACE // Remote Sensing. 2018. Vol. 10. Is. 9. Art. 1392. P. 1–20. DOI: 10.3390/rs10091392.
3. Ma Y. Y., Zuo X. Q., Ma W. F. Settlement monitoring and analysis of Tianjin area based on PS-InSAR // Remote Sensing Technology and Application. 2019. Vol. 34. Is. 6. P. 1324–1331. DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2019.6.1324.
4. Xia Y. P., Wang Y. J., Du S., Liu X. X. Zhou H. Y. Integration of D-InSAR and GIS technology for identifying illegal underground mining in Yangquan District, Shanxi Province, China // Environmental Earth Sciences. 2018. Vol. 77. Art. 319. DOI: 10.1007/s12665-018-7488-1.
5. Tong Y. X., Yang J. Q., Wang X., Tan K. Land subsidence monitoring and spatiotemporal evolution characteristics analysis of Datong Coalfield, Shanxi Province based on time series InSAR // Geology in China. 2024. Vol. 51. Is. 1. P. 170–183. DOI: 10.12029/gc20221215001.
6. Wang L., Deng K., Zheng M. Research on ground deformation monitoring method in mining areas using the probability integral model fusion D-InSAR, sub-band InSAR and offset-tracking // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2020. Vol. 85. Art. 101981. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.jag.2019.101981.
7. Пономаренко М. Р., Кутепов Ю. И., Волков М. А., Гринюк А. П. Космические методы в составе комплексного деформационного мониторинга земной поверхности горного предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 12. С. 103–113. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-103-113.
8. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2002. Vol. 40. Is. 11. P. 2375–2383. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792.
9. Lanari R., Mora O., Manunta M., Mallorqui J. J., Berardino P., Sansosti E. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms

- // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2004. Vol. 42. Is. 7. P. 1377–1386. DOI: 10.1109/TGRS.2004.828196.
10. 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. С. 97–104. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-6-97-104.
11. Milczarek W. Application of a small baseline subset time series method with atmospheric correction in monitoring results of mining activity on ground surface and in detecting induced seismic events // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Is. 9. Art. 1008. P. 1–23. DOI: 10.3390/rs11091008.
12. Xiong W., Sun Z. J., Zhang B. C. Surface subsidence monitoring in Tianjin based on ascending and descending time series InSAR technology // Geospatial Information. 2021. Vol. 19. Is. 12. P. 45–49.
13. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2000. Vol. 38. Is. 5. P. 2202–2212. DOI: 10.1109/36.868878.
14. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. Vol. 39. Is. 1. P. 8–20. DOI: 10.1109/36.898661.
15. European Space Agency (ESA). Sentinel-1 Product Specification. Document reference S1-RS-MDA-52-7441. Is. 3/13. Date: 14.10.2022. Frascati: ESA ESRIN. URL: <https://sentinels.copernicus.eu> (дата обращения: 15.05.2025).
16. NASA JPL. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global 1 Arc-Second V003 / NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). USGS. 2013. DOI: 10.5067/MEaSUREs/SRTM/SRTMGL1.003.
17. Huang J. L., Bai Y., Lei S. G., Deng K. Z. Time-series SBAS pixel offset tracking method for monitoring three-dimensional deformation in a mining area // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 118787–118798. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3004460.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.