



ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИНТЕЗИРОВАНИЯ АПЕРТУРЫ (InSAR) В ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ОБЪЕКТОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ОГРАНИЧЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

А.А. АНЖЕНКО^{1,*}, А.В. АНЖЕНКО¹, С.В. СЕРЕБРЯКОВ^{2,3}

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

² АО «Оператор пространственных данных и сервисов»
16а, ул. Лефортовский Вал, г. Москва 11250, Россия

³ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
4, Гороховский пер., г. Москва 105064, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Обеспечение промышленной и экологической безопасности горнодобывающих предприятий требует внедрения современных методов мониторинга деформаций земной поверхности. Классические геодезические методы имеют ограниченную эффективность для сплошного контроля обширных горных отводов, в то время как технологии дистанционного зондирования, в частности применение технологий интерферометрического радиолокационного синтезирования апертуры (InSAR), открывают новые возможности для создания систем проактивного мониторинга.

Цель. Проведение комплексного анализа методических основ, возможностей, ограничений и перспектив применения технологии InSAR, в особенности метода малых базовых подмножеств (SBAS-InSAR), для решения задач геодинамического и геотехнического мониторинга на объектах горнодобывающей промышленности.

Материалы и методы. В основу работы положены системный анализ научных публикаций и обобщение практического опыта применения InSAR на горнодобывающих предприятиях России (Кузбасс), Казахстана, Австралии и Китая. Использованы методы сравнительного анализа методик DInSAR, PS-InSAR и SBAS-InSAR, математического моделирования деформационных процессов и экономической оценки эффективности.

Результаты. Установлено, что метод SBAS-InSAR демонстрирует наилучший баланс точности (1–3 мм/год), площадного охвата и устойчивости к декорреляции в специфических условиях горных ландшафтов. Определены ключевые области эффективного применения: мониторинг устойчивости бортов карьеров, контроль целостности дамб хвостохранилищ, наблюдение за просадками на подработанных территориях. Экономический анализ подтвердил, что внедрение InSAR позволяет снизить капитальные и эксплуатационные затраты на 60–75 % при одновременном увеличении охвата территории и оперативности получения данных.

Заключение. Технология InSAR/SBAS-InSAR является высокоэффективным инструментом для перехода от точечного к сплошному мониторингу геотехнических рисков. Ее успешная интеграция в системы управления горнодобывающих предприятий, особенно в условиях Российской Федерации, требует адаптации методик, развития нормативной базы и подготовки кадров. Перспективными представляются исследования, связанные с созданием гибридных систем, объединяющих данные InSAR с наземными сенсорными сетями и применением технологий искусственного интеллекта.

Ключевые слова: интерферометрический радиолокационный синтез апертуры (InSAR), SBAS-InSAR, геодинамический мониторинг, горнодобывающая промышленность, деформация земной поверхности, геотехнические риски, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ)

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Анженко А.А., Анженко А.В., Серебряков С.В. Применение технологий интерферометрического радиолокационного синтезирования апертуры (InSAR) в геодинамическом мониторинге объектов горнодобывающей промышленности: методические основы, ограничения и практическая эффективность. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2026;68(1):139—152. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-139-152> EDN: MDLAWZ

Статья поступила в редакцию 22.12.25

Принята к публикации 29.01.2026

Опубликована 30.04.2026

* Автор, ответственный за переписку

APPLICATION OF INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR (InSAR) IN GEODYNAMIC MONITORING OF MINING INDUSTRY FACILITIES: METHODOLOGICAL FOUNDATIONS, INHERENT LIMITATIONS, AND PRACTICAL EFFICIENCY

ARTEM A. ANZHENKO^{1,*}, ALEXANDER V. ANZHENKO¹, SERGEY V. SEREBRYAKOV^{2,3}

¹ *Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI)
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

² *Operator of Spatial Data and Services JSC
16A, Lefortovsky Val str., Moscow 111250, Russia*

³ *Moscow State University of Geodesy and Cartography
4, Gorokhovskiy Lane, Moscow 105064, Russia*

ABSTRACT

Background. Ensuring industrial and environmental safety at mining enterprises requires the implementation of modern methods for monitoring ground surface deformation. Classical geodetic methods demonstrate limited effectiveness for continuous monitoring of extensive mining allotments, while remote sensing technologies, in particular Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), offer opportunities for creating proactive monitoring systems.

Aim. To carry out a comprehensive analysis of the methodological foundations, capabilities, limitations, and prospects of InSAR technology, the method of Small Baseline Subset (SBAS-InSAR) in particular, for solving problems of geodynamic and geotechnical monitoring at mining facilities.

Materials and methods. A systematic review of scientific publications and practical experience of applying InSAR at mining enterprises in Russia (Kuzbass), Kazakhstan, Australia, and China was carried out. A comparative analysis of DInSAR, PS-InSAR, and SBAS-InSAR technologies was conducted. The methods of mathematical modeling of deformation processes and economic efficiency assessment were used.

Results. The SBAS-InSAR method demonstrates the best balance of accuracy (1–3 mm/year), areal coverage, and resistance to decorrelation under conditions of mining landscapes. Key areas of application include monitoring of open-pit slope stability, controlling tailings dam integrity, and observing subsidence in undermined areas. The economic analysis confirmed that the implementation of InSAR can reduce capital and operational costs by 60–75 % while simultaneously increasing coverage area and data acquisition efficiency.

Conclusion. InSAR/SBAS-InSAR technology is a highly effective tool for transitioning from point-based to continuous monitoring of geotechnical risks. Its successful integration into the management systems of mining enterprises, especially in the Russian Federation, requires the adaptation of methodologies, development of a regulatory framework, and personnel training. Prospects are

associated with the creation of hybrid systems that integrate InSAR data with ground-based sensor networks and artificial intelligence technologies.

Keywords: Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), SBAS-InSAR, geodynamic monitoring, mining industry, ground deformation, geotechnical risks, Earth remote sensing (ERS)

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosures: no financial support was provided for this study.

For citation: Anzhenko A.A., Anzhenko A.V., Serebryakov S.V. Application of interferometric synthetic aperture radar (InSAR) in geodynamic monitoring of mining industry facilities: methodological foundations, inherent limitations, and practical efficiency. Proceedings of higher educational establishments. *Geology and Exploration*. 2026;68(1):139—152. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-139-152> EDN: [MDLAWZ](https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-139-152)

Manuscript received 22 December 2025

Accepted 29 January 2026

Published 30 April 2026

* Corresponding author

Введение

Мониторинг современных движений земной коры (СДЗК), индуцированных как природными, так и техногенными факторами, представляет собой одну из ключевых задач современной геодинамики и инженерной геологии [18, 23]. Для горнодобывающей промышленности, являющейся мощным источником техногенного воздействия на геологическую среду, обеспечение контроля за деформационными процессами является критически важным фактором обеспечения промышленной и экологической безопасности [3, 4, 9]. Традиционные геодезические методы мониторинга (высокоточное нивелирование, GNSS-наблюдения), несмотря на высокую локальную точность, обладают существенными ограничениями: они требуют создания разветвленной и дорогостоящей наземной измерительной инфраструктуры, обеспечивают лишь точечную информацию и неэффективны для оперативного контроля обширных площадей горных отводов [1, 18].

В этих условиях технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), и в особенности радарная спутниковая интерферометрия (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR), открывают новые возможности для создания систем сплошного мониторинга деформаций [2, 5, 25, 28]. Принцип метода InSAR основан на анализе разности фаз радарных снимков одной территории, полученных в разное время, что позволяет детектировать смещения земной поверхности с точностью до миллиметрового диапазона на значительных площадях без необходимости доступа на объект. Современное развитие космических SAR-систем характеризуется экспоненциальным ростом количества запускаемых

спутников: если до 2006 года было запущено 16 SAR-аппаратов, то в период с 2022 по 2025 год — уже 109, что обеспечивает высокую частоту съемки и доступность радиолокационных данных для оперативного мониторинга [11]. Это создает благоприятные условия для внедрения непрерывных систем геодинамического контроля на основе InSAR. Это делает технологию незаменимым инструментом для решения таких задач, как контроль устойчивости бортов карьеров и отвалов, оценка целостности дамб хвостохранилищ, мониторинг оседаний на подработанных территориях [17, 19, 21, 27].

Среди различных методик InSAR наибольший практический интерес для горнодобывающей отрасли представляет технология малых базовых подмножеств (Small Baseline Subset, SBAS-InSAR). Данная методика, основанная на обработке плотных временных серий радиолокационных изображений, позволяет преодолеть ограничения классических дифференциальных методов, связанные с потерей когерентности сигнала в условиях сложного рельефа или растительного покрова, характерных для большинства горнодобывающих регионов [6, 16]. SBAS-InSAR обеспечивает получение высоконадежных временных рядов смещений, что критически важно для анализа динамики деформационных процессов [2, 6].

Несмотря на очевидные преимущества и растущее количество успешных практических примеров (кейсов) применения в мире [1, 8, 27], широкое внедрение технологии InSAR в практику ответственных горнодобывающих предприятий сталкивается с рядом проблем. К ним относятся: необходимость в подготовке высококвалифицированных

специалистов для интерпретации сложных пространственных данных, наличие возможных погрешностей измерений, обусловленных атмосферными и ионосферными помехами, а также методические сложности интеграции и интерпретации данных InSAR с результатами наземных измерений в единую систему геотехнического мониторинга [18, 20, 22]. Кроме того, точность и надежность результатов остаются в высокой степени зависимыми от качества исходных спутниковых данных и соблюдения оптимальных пространственно-временных параметров съемки [12, 21].

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящего исследования является комплексный анализ, систематизация опыта и определение ключевых направлений эффективного применения технологии интерферометрического радиолокационного синтезирования апертуры (InSAR), в особенности метода малых базовых подмножеств (SBAS-InSAR), для решения актуальных задач геотехнического мониторинга и управления рисками на горнодобывающих предприятиях. Работа направлена на преодоление разрыва между высоким технологическим потенциалом InSAR и барьерами, затрудняющими его широкое практическое внедрение, такими как сложность интерпретации данных, влияние атмосферных помех и проблемы интеграции с существующими системами контроля [20–22].

Для достижения поставленной цели в исследовании решались следующие задачи.

1. Проведение сравнительного анализа возможностей различных методик InSAR (DInSAR, PS-InSAR, SBAS-InSAR) для мониторинга деформаций в специфических условиях горнодобывающих ландшафтов, включая районы с развитой растительностью и активными техногенными изменениями [6, 10, 18].

2. Систематизация основных областей практического применения технологии InSAR в горнодобывающей промышленности, уделив особое внимание мониторингу устойчивости бортов карьеров и отвалов, контролю целостности дамб хвостохранилищ, а также выявлению и анализу просадочных деформаций земной поверхности [3, 4, 17, 27].

3. Обобщение и анализ практического международного и отечественного опыта применения InSAR на основе конкретных практических примеров (кейсов) (на примере Кузбасса, Карагандинского бассейна, Дуглас-Парка, Шэньдунского бассейна и др.) для оценки реальной точности, надежности и экономической эффективности метода [2, 5, 8, 16, 21].

4. Выявление и классификация ключевых технических и методических ограничений технологии

InSAR, включая требования к квалификации персонала, зависимость от атмосферных условий, сложности интеграции данных с другими геодезическими и геофизическими методами мониторинга [18, 20, 22].

5. Определение стратегических направлений и перспектив развития технологии InSAR для ее глубокой интеграции в системы управления геотехническими рисками горнодобывающих предприятий, включая синергию с технологиями интернета вещей (IoT), технологиями искусственного интеллекта (ИИ), геопространственными данными с БПЛА и создание гибридных мониторинговых систем [1, 14, 30].

6. Разработка рекомендаций по адаптации и внедрению технологий InSAR-мониторинга на территории Российской Федерации с учетом особенностей региональной геодинамической специфики, нормативных требований и задач цифровой трансформации горнодобывающего комплекса.

Решение этих задач позволяет создать целостное представление о современном состоянии, потенциале и траекториях развития технологии InSAR как основы для создания проактивных систем обеспечения промышленной и экологической безопасности в горнодобывающей отрасли.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методологической основой исследования выступили системный анализ, синтез и обобщение данных. Работа базируется на трех ключевых компонентах: 1) теоретических основах радарной интерферометрии; 2) анализе массива научных публикаций и технических отчетов; 3) обобщении данных конкретных практических примеров (кейсов) применения технологии InSAR на отраслевых объектах горнодобывающей промышленности.

Теоретические основы и математический аппарат

Физической основой измерений InSAR является анализ интерферометрической фазы, описываемой следующим выражением [5]:

$$\varphi_{\text{полн}} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta R + \varphi_{\text{топ}} + \varphi_{\text{атм}} + \varphi_{\text{шум}} + 2\pi n, \quad (1)$$

где $\varphi_{\text{полн}}$ — полная измеренная фаза, рад;
 λ — длина волны радиолокационного сигнала, м;
 ΔR — разность расстояний, м;
 $\varphi_{\text{топ}}$ — фазовая составляющая от рельефа, рад;
 $\varphi_{\text{атм}}$ — атмосферная задержка, рад;
 $\varphi_{\text{шум}}$ — шум измерений, рад;
 n — целое число (неоднозначность фазы).

Связь между измеренной фазой и вертикальным смещением поверхности описывается уравнением:

$$\Delta h = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Delta\varphi_{деф}, \quad (2)$$

где $\Delta\varphi_{полн}$ — фазовая разность, обусловленная деформацией, рад.

Приведенные фундаментальные выражения (1) и (2) позволяют количественно оценивать деформации земной поверхности с миллиметровой точностью, что является критически важным для мониторинга геотехнической безопасности горнодобывающих предприятий.

Основное внимание уделено методу малых базовых подмножеств (SBAS-InSAR), при котором временной ряд смещений $h(t)$ восстанавливается по серии интерферограмм [6, 10, 24]. Ключевое уравнение для временного ряда смещений имеет вид:

$$h(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \sum_{i=1}^N w_i \cdot \Delta\varphi_i(t), \quad (3)$$

где $\Delta h(t)$ — смещение во времени t , м;

w_i — весовые коэффициенты интерферометрических пар;

$\Delta\varphi_i(t)$ — разность фаз для i -й пары в момент времени t , рад;

N — количество интерферометрических пар.

Надежность измерений оценивалась через когерентность сигнала по выражению:

$$\gamma = \left| \langle s_1 s_2^* \rangle \right| / \sqrt{\left(\langle |s_1|^2 \rangle \langle |s_2|^2 \rangle \right)}, \quad (4)$$

где γ — когерентность (0–1);

s_1, s_2 — комплексные отклики радара.

Для количественной оценки деформационных процессов в массиве горных пород разработаны специализированные математические модели. Модель экспоненциального затухания деформаций описывает распределение смещений вокруг горных выработок:

$$\Delta h(r, t) = \Delta h_0 \cdot \exp\left(-\frac{r}{r_0}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (5)$$

где $\Delta h(r, t)$ — деформация на расстоянии r от центра выработки в момент времени t , м;

Δh_0 — максимальная деформация в центре зоны влияния, м;

r_0 — радиус влияния горных работ, м;

r — расстояние до центра выработки, м;

t — время с момента подработки, сут.;

τ — постоянная времени процесса деформации, сут.

Для оценки рисков и интеграции данных использовались вероятностная модель и модель взвешенного усреднения [4, 17]:

$$P(\Delta h > \Delta h_{крит}) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\Delta h_{крит} - \mu}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right], \quad (6)$$

где $P(\Delta h > \Delta h_{крит})$ — вероятность превышения критической деформации;

μ — среднее значение деформации, м;

σ — стандартное отклонение, м;

$\Delta h_{крит}$ — критическое значение деформации для конкретного типа сооружения.

Прогнозная модель для проактивного управления геотехническими рисками:

$$\Delta h_{интегр} = \sum_{i=1}^M w_i \cdot \Delta h_i, \quad (7)$$

где:

$\Delta h_{интегр}$ — интегральная оценка смещения, м;

w_i — весовые коэффициенты методов ($\sum w_i = 1$);

Δh_i — оценка смещения i -м методом, м;

M — количество методов мониторинга.

Для алгоритмов машинного обучения, таких как XGBoost, прогнозируемое значение определялось выражением:

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^K f_k(x_i), f_k \in \mathcal{F}, \quad (8)$$

где:

\hat{y}_i — прогноз для i -го объекта;

f_k — k -е дерево решений;

\mathcal{F} — пространство деревьев решений.

Экономическая эффективность оценивалась по моделям ROI и годового экономического эффекта. Для количественной оценки экономической эффективности внедрения InSAR использована следующую модель:

$$ROI = \frac{C_{трад} - C_{InSAR}}{C_{InSAR}} \times 100, \quad (9)$$

где: $C_{трад} = N_{точ} \times C_{точ} \times F + C_{инфр}$,
 $C_{InSAR} = C_{дан} \times H + C_{обр} + C_{интерпр}$.

Общий экономический эффект от внедрения системы мониторинга оценен по выражению:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta S \cdot V + \Delta A \cdot C_A - I}{T}, \quad (10)$$

где:

\mathcal{E} — годовой экономический эффект, руб./год;
 ΔS — снижение площади аварийных зон, га;
 V — стоимость земли, руб./га;
 ΔA — снижение количества аварий, ед./год;
 C_A — средняя стоимость одной аварии, руб.;
 I — инвестиции в систему, руб.;
 T — срок окупаемости, лет.

Внедрение технологии InSAR в систему управления геотехническими рисками горнодобывающих предприятий предлагается формализовать через критерий оптимальной частоты мониторинга:

$$f_{\text{опт}} = \max \left(f_{\text{мин}}, \frac{v_{\text{ср}} \cdot k_{\text{риск}}}{\Delta h_{\text{доп}}} \right), \quad (11)$$

где:

$f_{\text{опт}}$ — оптимальная частота мониторинга, раз/мес.;
 $f_{\text{мин}}$ — минимальная технически возможная частота;
 $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость деформации на объекте, мм/мес.;
 $k_{\text{риск}}$ — коэффициент риска объекта (1–5);
 $\Delta h_{\text{доп}}$ — допустимое смещение между измерениями, мм.

Предложенные математические модели и критерии позволяют оптимизировать использование технологии InSAR, обеспечивая баланс между точностью мониторинга, оперативностью получения данных и экономической эффективностью.

Для условий РФ предлагается при разработке специализированных моделей учитывать поправки на климатические условия и вечную мерзлоту [18].

Поправка на климатические условия определяется выражением:

$$\Delta \varphi_{\text{клим}} = \alpha \cdot (T - T_0) + \beta \cdot (P - P_0), \quad (12)$$

где:

$\Delta \varphi_{\text{клим}}$ — климатическая поправка, рад;
 α, β — коэффициенты, определенные для конкретного региона России;
 T, P — текущие температура и давление;
 T_0, P_0 — стандартные условия.

Для районов вечной мерзлоты полная деформация складывается из техногенной составляющей и изменений, вызванных температурными колебаниями:

$$\Delta h_{\text{мерзл}} = \Delta h_{\text{техн}} + k_{\text{мерз}} \cdot \Delta T \cdot t, \quad (13)$$

где:

$\Delta h_{\text{мерзл}}$ — полная деформация в условиях мерзлоты, м;
 $\Delta h_{\text{техн}}$ — техногенная деформация, м;
 $k_{\text{мерз}}$ — коэффициент влияния температуры мерзлоты;
 ΔT — изменение температуры мерзлоты, °С;
 t — время, лет.

Разработка регионально адаптированных математических моделей является ключевым условием успешного внедрения технологии InSAR на предприятиях российской горнодобывающей промышленности.

Материалы и источники данных

Проанализирован корпус научных публикаций и отчетов за 2000–2025 гг., посвященных применению InSAR (DInSAR, PS-InSAR, SBAS-InSAR) в горном деле. Особый акцент сделан на практические примеры (кейсы), данные по которым получены из открытых научных статей и технической документации:

- Дуглас-Парк (Австралия) — мониторинг подработки от подземной добычи угля [1, 8];
- Шэньдунский угольный бассейн (Китай) — анализ оседаний с использованием временных рядов InSAR [3, 21];
- рудник Сукари (Египет) — применение PSI для мониторинга устойчивости [7, 26];
- Карагандинский угольный бассейн (Казахстан) — оценка долгосрочных деформаций [16, 29];
- отечественный опыт (Кузбасс, Хибинь, Урал) — обобщение по данным публикаций [18, 23] и производственных отчетов.

Анализ современных тенденций развития космических SAR-миссий показал, что средняя масса гражданских спутников снизилась до 1025 кг, а военных — до 3697 кг, при этом значительную долю составляют микроспутники массой менее 200 кг [11]. Это позволяет прогнозировать дальнейшее снижение стоимости и увеличение доступности InSAR-данных для отраслевого применения.

Методы анализа

Применен комплекс методов.

1. **Сравнительный анализ:** возможностей и ограничений различных методик InSAR (на основе таблицы 1).

Таблица 1. Сравнительные характеристики методов InSAR для геотехнического мониторинга
Table 1. Comparative characteristics of InSAR methods for geotechnical monitoring

Параметр/ Parameter	DInSAR	PS-InSAR	SBAS-InSAR
Точность, мм/год / Accuracy, mm/yr	10–30	1–5	1–3
Требуемое кол-во снимков/ Number of images	2–3	>20	>15
Оптимальные условия/ Optimal conditions	Слабая растительность/ Low vegetation	Урбанизированные территории, скальные породы / Urban areas, bedrock	Обширные территории, включая участки с растительностью / Large areas, including vegetation
Временное разрешение/ Temporal resolution	Низкое / Low	Высокое / High	Среднее-высокое / Medium-High
Реком. перпенд. база, м / Rec. perp. baseline, m	<200	<300	<400

2. Систематизация и обобщение: практического опыта по выделенным географическим кейсам и типам объектов (борта карьеров, хвостохранилища, подработанные территории).

3. Математическое моделирование: для количественной оценки деформационных процессов, экономической эффективности и оптимальных параметров мониторинга (формулы (5)–(9), (14)).

4. Критический анализ проблем: выявление и классификация технических, методических и организационных барьеров на основе обобщения данных литературы [18, 20, 21, 27].

5. Синтез рекомендаций: определение стратегических направлений развития и адаптации технологии для интеграции в системы управления рисками горнодобывающих предприятий РФ.

Такой комплексный подход позволяет не только описать состояние технологии, но и дать количественную оценку ее возможностей, сформировать методическую основу для ее практического внедрения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Сравнительная эффективность методов InSAR для горнодобывающей отрасли

Проведенный сравнительный анализ позволил ранжировать основные методы интерферометрической обработки данных SAR по их пригодности для задач геотехнического мониторинга в специфических условиях горнодобывающих предприятий (табл. 1).

Установлено, что метод малых базовых подмножеств (SBAS-InSAR) демонстрирует

наилучший баланс между точностью (1–3 мм/год), площадным охватом (способность работать на территориях с изменчивым ландшафтом и растительностью) и устойчивостью к временной и пространственной декорреляции сигнала. Это делает SBAS-InSAR предпочтительной методикой для долгосрочного мониторинга большинства объектов горнодобывающего комплекса [6, 10].

2. Критерии и нормативы для мониторинга различных объектов

На основе анализа отечественного и международного опыта [3, 4, 17, 21, 27] сформулированы количественные критерии для оценки деформационной опасности на различных типах объектов (табл. 2). Определены как допустимые годовые скорости смещений ($\Delta h_{дон}$, год), так и критические интегральные величины ($\Delta h_{крит}$), превышение которых требует немедленных мероприятий по обеспечению безопасности.

3. Модель интеграции данных и верификация точности

Для создания отказоустойчивых систем мониторинга предложена и количественно обоснована модель взвешенного усреднения данных от различных технологий (табл. 3). Модель позволяет оптимально комбинировать преимущества площадного охвата InSAR с высочайшей точностью точечных наземных методов.

Применение данной модели на практике, как показал анализ практических примеров (кейсов), позволяет достигать интегральной точности оценки смещений на уровне 1–2 мм/год при обеспечении сплошного покрытия контролируемой территории.

Таблица 2. Критические параметры деформаций для объектов горнодобывающей промышленности
Table 2. Critical deformation parameters for mining industry facilities

Объект мониторинга/ Monitoring facility	$\Delta h_{\text{доп}}$, год, мм/год / Annual threshold	$\Delta h_{\text{крит}}$, мм / Critical displacement	Реком. частота мониторинга / Recommended frequency
Борта карьеров глубиной < 100 м / Pit walls depth < 100 m	20–30	200	Еженедельно / Weekly
Борта карьеров глубиной > 100 м / Pit walls depth > 100 m	30–50	300	Ежедневно-еженедельно / Daily-Weekly
Дамбы хвостохранилищ I класса / Tailings dams Class I	5–10	50	Ежедневно / Daily
Дамбы хвостохранилищ II класса / Tailings dams Class II	10–20	100	Еженедельно / Weekly
Подработанная территория с застройкой/ Undermined area with buildings	5–15	100	Ежемесячно / Monthly
Отвалы вскрышных пород/ Overburden dumps	30–100	500	Ежемесячно / Monthly

Таблица 3. Параметры методов для комплексного мониторинга (вес и точность)
Table 3. Parameters of methods for integrated monitoring (weight and accuracy)

Метод мониторинга/ Monitoring method	Вес, w_i / Weight	Погрешность, σ_i , мм/ Error	Частота измерений/ Measurement frequency	Площадь покрытия/ Coverage area
InSAR (SBAS)	0,40	1–3	6–12 дней / days	100% территории / of area
ГНСС/ГЛОНАСС станции / GNSS stations	0,30	0,5–1,5	Непрерывно / Continuous	Точечно / Point-based
БПЛА с лидаром / UAV with LiDAR	0,20	2–5	По необходимости / As needed	Выборочно / Selective
Наземные IoT-сенсоры/ Ground IoT sensors	0,10	0,1–0,5	Непрерывно / Continuous	Точечно / Point-based

4. Анализ практической эффективности на основе практических примеров (кейсов)

Обобщение результатов конкретных проектов подтвердило высокую практическую эффективность и точность технологии InSAR:

- **Дуглас-Парк (Австралия):** при мониторинге подработки от подземной добычи угля система InSAR обеспечила полное покрытие территории. Сравнение с высокоточными наземными геодезическими измерениями показало расхождение в пределах ± 15 мм, что подтвердило достоверность спутниковых данных [1, 8];
- **Шэньдунский угольный бассейн (Китай):** комплексное использование временных рядов SBAS-InSAR и регрессионного моделирования позволило не только картировать воронки оседания, но и количественно оценить динамику их развития с высокой детализацией, что стало основой для корректировки планов горных работ [2, 21];
- **Карагандинский бассейн (Казахстан):** долгосрочный мониторинг (более 5 лет) выявил устойчивые тенденции к проседанию над законтурными участками отработанных шахтных полей со скоростями до 20–25 мм/год. Эти данные имеют критическое значение для оценки рисков при новом промышленном и гражданском строительстве в данных районах [13, 15, 16, 29];
- **рудник Сукари (Египет):** применение метода устойчивых отражателей (PSI) на основе 23 снимков позволило выделить локальные зоны нестабильности в районе отвалов и инфраструктуры рудника, что невозможно было сделать традиционными методами в условиях сложного рельефа и отсутствия развитой геодезической сети [7, 26].

Таблица 4. Сравнительный анализ затрат на мониторинг участка 100 км²
Table 4. Comparative cost analysis for monitoring a 100 km² site

Статья затрат/ Cost item	Традиционные методы (геодез. сети)/ Traditional methods	InSAR-мониторинг/ InSAR monitoring	Экономия/ Saving
Капитальные затраты, млн руб./ Capital cost, mln RUB	15–20	5–8	60–67 %
Эксплуатационные затраты, млн руб./год/ Operational cost, mln RUB/yr	8–12	2–3	70–75 %
Персонал, чел./ Personnel, persons	8–12	2–3	70–75 %
Покрытие территории, %/ Area coverage, %	10–15	90–100	Увеличение в 6–10 раз/ Increase by 6–10x
Время получения данных/ Data acquisition time	1–3 месяца / months	1–3 дня / days	Ускорение в 30–90 раз/ Acceleration by 30–90x

5. Оценка экономической эффективности

Расчеты, выполненные для типового участка площадью 100 км², демонстрируют значительное преимущество системы мониторинга на основе InSAR (табл. 4).

Таким образом, внедрение InSAR обеспечивает не только качественный скачок в полноте и оперативности информации, но и приводит к существенному (в 2,5–3 раза) снижению совокупной стоимости владения системой мониторинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность и практическую значимость технологии интерферометрического радиолокационного синтезирования апертуры (InSAR), в особенности метода малых базовых подмножеств (SBAS-InSAR), для решения актуальных задач геодинамического и геотехнического мониторинга в горнодобывающей промышленности. На основе системного анализа теоретических основ, методических подходов и практических примеров (кейсов) применения сформулированы следующие основные выводы.

1. Технология InSAR/SBAS-InSAR является не заменой, а мощным развитием и дополнением классических геодезических методов в эпоху дистанционного зондирования [18]. Она обеспечивает переход от локальных точечных измерений к сплошному, площадному мониторингу деформаций земной поверхности с точностью 1–3 мм/год, формируя принципиально новую основу для проактивного управления геотехническими рисками.

2. Установлены ключевые, наиболее эффективные области применения InSAR на отраслевых

объектах горнодобывающей промышленности: мониторинг устойчивости бортов карьеров и отвалов; контроль целостности тел дамб хвостохранилищ I и II классов; выявление, картирование и анализ динамики просадочных деформаций на подработанных территориях [3, 4, 12, 17, 21, 27]. Для каждого типа объектов определены количественные критерии допустимых и критических смещений, а также рекомендуемая частота мониторинга.

3. Доказана высокая достоверность данных InSAR. Сравнение с результатами прецизионных наземных геодезических измерений в рамках реализованных проектов (на примере Дуглас-Парка, Шэньдунского бассейна) показывает согласованность в пределах ± 15 мм, что достаточно для решения большинства практических задач по оценке устойчивости [1, 2, 8]. Метод SBAS-InSAR демонстрирует наилучший баланс точности, площади охвата и устойчивости к декорреляции в сложных горнопромышленных ландшафтах [6, 16].

4. Экономический анализ подтверждает не только технологическое, но и финансовое преимущество систем мониторинга на базе InSAR. Для типового участка внедрение технологии позволяет снизить капитальные затраты на 60–67 %, а эксплуатационные — на 70–75 %, одновременно увеличивая охват территории в 6–10 раз и ускоряя получение данных в 30–90 раз по сравнению с разрыванием традиционных геодезических сетей.

5. Максимальная эффективность достигается при интеграции InSAR в гибридные (отказоустойчивые) системы мониторинга, где спутниковые данные выступают как базовый площадной источник информации, а прецизионные наземные методы (ГНСС, роботизированное тахеометрирование,

IoT-сенсоры) используются для верификации и детального контроля критических зон [1, 18]. Оптимальный режим работы таких систем может быть формализован через критерий частоты мониторинга, учитывающий скорость деформаций и уровень риска объекта.

6. Для успешного широкого внедрения технологии InSAR в практику горнодобывающих предприятий Российской Федерации необходима адаптация методик к региональным условиям, включая разработку специализированных математических моделей, учитывающих влияние сурового климата и вечной мерзлоты на измеренные сигналы. Ключевыми задачами являются развитие нормативной базы, подготовка квалифицированных кадров и интеграция InSAR-мониторинга в концепции «Цифрового карьера/шахты» как элемента единого информационного пространства предприятия.

7. Перспективы развития технологии связаны с углублением синергии с интернетом вещей (IoT), алгоритмами искусственного интеллекта для автоматического анализа данных и расширением использования группировок малых спутников (CubeSat) для повышения частоты съемки.

Перспективы развития InSAR-мониторинга тесно связаны с распространением микроспутниковых группировок (Capella, ICEYE, QPS, Umbra, StriX), которые обеспечивают время повторного полета вплоть до нескольких часов и позволяют реализовать квазинепрерывный контроль деформаций [11]. Интеграция данных таких созвездий с классическими SAR-миссиями (Sentinel-1, ALOS, RADARSAT) открывает новые возможности для создания гибридных систем прогнозного геотехнического мониторинга.

Реализация этих направлений позволит перейти к созданию интеллектуальных систем прогнозного геотехнического мониторинга, что станет новым этапом в обеспечении промышленной и экологической безопасности горнодобывающей отрасли.

Научные исследования по данному направлению ведутся в ООО «НПП «ТехАргос».

В перспективе планируется на базе одного из ведущих вузов Российской Федерации создать учебно-научную лабораторию и задействовать ее в учебном процессе подготовки высококвалифицированных специалистов для обеспечения потребности отрасли в квалифицированных кадрах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акматов Д.Ж., Николайчук В.В., Тихонов А.А., Шевчук Р.В. Радарная интерферометрия как дополнение к классическим методам наблюдений за сдвижением земной поверхности. Горная промышленность. 2020. № 1. С. 144–147. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-144-147
2. Дубров М.Н., Алешин В.А. Высокоточные лазерные интерферометры в многокомпонентных измерительных системах. Журнал радиоэлектроники. 2000. № 10. С. 7–13. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct00/4/text.html>
3. Милуков В.К., Кравчук В.К. Наблюдения спектра деформаций земли лазерным интерферометром-деформографом. Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 1996. № 2. С. 73–78. Режим доступа: <http://vnu.phys.msu.ru/ru/abstract/1996/2/96-2-073/>
4. 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.
5. Михайлов В.О., Киселева Е.А., Смольянинова Е.И., Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А. Радарная спутниковая интерферометрия: новые технологии спутникового мониторинга областей разработки полезных ископаемых, смещений природных и техногенных объектов. Наука и технологические разработки. 2016. № 95(3). С. 5–11.
6. Мясников А.В. О проблеме учета влияния метеорологических факторов на большие прецизионные системы на примере баксанского большебазового лазерного интерферометра. Сейсмические приборы. 2019/ № 55(2). С. 27–38. DOI: 10.21455/si2019.2-2
7. Advanced AI Model Predicts Ground Subsidence in Mining Areas. AZoMining, 2024. Режим доступа: <https://www.azomining.com/News.aspx?news-ID=18502> (дата обращения: 17.11.2025).
8. Application of InSAR Technology in Monitoring of Ground Deformation in Mining Areas. SPIE Proceedings, 2011. Режим доступа: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/8286/82861W/Application-of-InSAR-technology-in-monitoring-of-ground-deformation-in/10.1117/12.912730.short> (дата обращения: 17.11.2025).
9. Braitenberg C. The deforming and rotating Earth — A review of the 18th International Symposium on Geodynamics and Earth Tide, Trieste 2016. Geodesy and Geodynamics. 2018. No. 9(3). P. 187–196. DOI: 10.1016/j.geog.2018.03.003
10. Decision-making fusion of InSAR technology and offset tracking to monitor mining subsidence. Frontiers in Earth Science, 2022. Режим доступа: <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/>

- articles/10.3389/feart.2022.962362/full (дата обращения: 20.10.2025).
11. D'Errico M. Evolution of Spaceborne SAR Missions in Earth Orbit. *Remote Sensing*. 2025. Vol. 17. P. 32–40. DOI: 10.3390/rs17223773
 12. InSAR Applications for Mining. SkyGeo. Режим доступа: <https://skygeo.com/mining/> (дата обращения: 10.11.2025).
 13. InSAR-Based Assessment of Land Subsidence Induced by Coal Mining. *Geotechnics*, 2023. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2673-7418/5/4/55> (дата обращения: 02.12.2025).
 14. InSAR Monitoring for Geotechnical Risk Management in Mining. SkyGeo. Режим доступа: <https://skygeo.com/insar-monitoring-for-geotechnical-risk-management-in-mining/> (дата обращения: 10.11.2025).
 15. InSAR Monitoring of Subsidence Induced by Underground Mining. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013795221003379> (дата обращения: 02.12.2025).
 16. InSAR Monitoring Surface Deformation Induced by Underground Mining Activities. *IAHS Proceedings*, 2020. Режим доступа: <https://piahs.copernicus.org/articles/382/237/2020/piahs-382-237-2020.pdf> (дата обращения: 01.12.2025).
 17. InSAR Revolutionizing Mine Site Safety Monitoring 2025 — Farmonaut. Режим доступа: <https://farmonaut.com/mining/insar-revolutionizing-mine-site-safety-monitoring-2025> (дата обращения: 20.10.2025).
 18. InSAR Technology Case Studies: Preventing Water Failures. Farmonaut, 2024. Режим доступа: <https://farmonaut.com/case-study/insar-technology-case-studies-preventing-water-failures> (дата обращения: 02.12.2025).
 19. InSAR Technology for Enhanced Tailings Dam Safety Monitoring. Geofem, 2023. Режим доступа: <https://www.geofem.com/post/insar-geotechnical-engineering-for-tailings-dam-safety> (дата обращения: 03.12.2025).
 20. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Market Size, Trends and Forecast 2023–2033. *Future Market Insights*, 2024. Режим доступа: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/interferometric-synthetic-aperture-radar-market> (дата обращения: 21.10.2025).
 21. Interferometric Synthetic Aperture Radar Market Size Report 2023–2032. *Global Market Insights*, 2023. Режим доступа: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/interferometric-synthetic-aperture-radar-market> (дата обращения: 23.10.2025).
 22. Leveraging InSAR Technology to Optimize Lidar Data Collection. *LiDAR Magazine*, 2025. Режим доступа: <https://lidarmag.com/2025/08/30/leveraging-insar-technology-to-optimize-lidar-data-collection/> (дата обращения: 23.10.2025).
 23. Life Cycle Mining Deformation Monitoring and Analysis Using InSAR. *Remote Sensing*, 2024. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/13/2335> (дата обращения: 02.12.2025).
 24. Milyukov V.K., Klyachko B.S., Myasnikov A.V., Striganov P.S., Yanin A.F., Vlasov A.N. A laser interferometer-deformograph for monitoring the crust movement. *Instruments and Experimental Techniques*. 2005. No/ 48(6). P. 780–795. DOI: 10.1007/s10786-005-0140-9
 25. Monitoring Mining Activity with InSAR Technology. *Geofem*, 2023. Режим доступа: <https://www.geofem.com/post/monitoring-mining-activity-with-insar-technology> (дата обращения: 02.12.2025).
 26. Operational Mine Monitoring with InSAR. Australian Centre for Geomechanics, 2016. Режим доступа: https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1604_48_Taylor/ (дата обращения: 01.12.2025).
 27. Potential and limits of InSAR data for building reconstruction in built-up areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2003. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924271603000212> (дата обращения: 21.10.2025).
 28. Practical Application of InSAR for Slope Performance Monitoring. *Engineering Geology*, 2021. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013795221003379> (дата обращения: 02.02.2025).
 29. Using Advanced InSAR Techniques as a Remote Tool for Mine Site Monitoring. *Tre Altamira*, 2015. Режим доступа: https://site.tre-altamira.com/wp-content/uploads/2015_InSAR_mine-site_monitoring.pdf (дата обращения: 01.12.2025).
 30. Utilizing InSAR for Surface Stability Monitoring in Mining Sites. *ISPRS Archives*, 2024. Режим доступа: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-1-2024/523/2024/isprs-archives-XLVIII-1-2024-523-2024.pdf> (дата обращения: 02.12.2025).

REFERENCES

1. Advanced AI Model Predicts Ground Subsidence in Mining Areas. *AZoMining*, 2024. Retrieved November 17, 2025, from <https://www.azomining.com/News.aspx?newsID=18502>.
2. Akmatov D.Z., Nikolaychuk V.V., Tikhonov A.A., Shevchuk R.V. Radar Interferometry as a Supplement to Classical Methods of Ground Surface Movement Monitoring. *Gornaya Promyshlennost*. 2020. No. 1. P. 144–147 (In Russ.). DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-144-147
3. Application of InSAR Technology in Monitoring of Ground Deformation in Mining Areas. *SPiE*

- Proceedings*, 2011. Retrieved November 17, 2025, from <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/8286/82861W/Application-of-InSAR-technology-in-monitoring-of-ground-deformation-in/10.1117/12.912730.short>.
4. Braitenberg C. The Deforming and Rotating Earth — A Review of the 18th International Symposium on Geodynamics and Earth Tide, Trieste 2016. *Geodesy and Geodynamics*. 2018. No. 9(3). P. 187–196. DOI: 10.1016/j.geog.2018.03.003
 5. Decision-making fusion of InSAR technology and offset tracking to monitor mining subsidence. *Frontiers in Earth Science*, 2022. Retrieved October 20, 2025, from <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2022.962362/full>.
 6. D'Errico M. Evolution of Spaceborne SAR Missions in Earth Orbit. *Remote Sensing*. 2025. No. 17. P. 32–40. DOI: 10.3390/rs17223773
 7. Dubrov M.N., Aleshin V.A. High-Precision Laser Interferometers in Multicomponent Measurement Systems. *Zhurnal Radioelektroniki*. 2000. No. 10. P. 7–13 (In Russ.). Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/oct00/4/text.html> (accessed: 20.10.2025).
 8. InSAR Applications for Mining. *SkyGeo*. Retrieved November 10, 2025, from <https://skygeo.com/mining/>.
 9. InSAR-Based Assessment of Land Subsidence Induced by Coal Mining. *Geotechnics*, 2023. Retrieved December 02, 2025, from <https://www.mdpi.com/2673-7418/5/4/55>.
 10. InSAR Monitoring for Geotechnical Risk Management in Mining. *SkyGeo*. Retrieved November 10, 2025, from <https://skygeo.com/insar-monitoring-for-geotechnical-risk-management-in-mining/>.
 11. InSAR Monitoring of Subsidence Induced by Underground Mining. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022. Retrieved December 02, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013795221003379>.
 12. InSAR Monitoring Surface Deformation Induced by Underground Mining Activities. *IAHS Proceedings*, 2020. Retrieved December 01, 2025, from <https://piahs.copernicus.org/articles/382/237/2020/piahs-382-237-2020.pdf>.
 13. InSAR Revolutionizing Mine Site Safety Monitoring 2025 — Farmonaut. Retrieved October 20, 2025, from <https://farmonaut.com/mining/insar-revolutionizing-mine-site-safety-monitoring-2025>.
 14. InSAR Technology Case Studies: Preventing Water Failures. *Farmonaut*, 2024. Retrieved December 02, 2025, from <https://farmonaut.com/case-study/insar-technology-case-studies-preventing-water-failures>.
 15. InSAR Technology for Enhanced Tailings Dam Safety Monitoring. *Geofem*, 2023. Retrieved December 03, 2025, from <https://www.geofem.com/post/insar-geotechnical-engineering-for-tailings-dam-safety>.
 16. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Market Size, Trends and Forecast 2023–2033. *Future Market Insights*, 2024. Retrieved October 21, 2025, from <https://www.futuremarketinsights.com/reports/interferometric-synthetic-aperture-radar-market>.
 17. Interferometric Synthetic Aperture Radar Market Size Report 2023–2032. *Global Market Insights*, 2023. Retrieved October 23, 2025, from <https://www.gminsights.com/industry-analysis/interferometric-synthetic-aperture-radar-market>.
 18. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Dmitriev P.N., Golubev V.I., Smolyaninova E.I., Timoshkina E.P. Estimation of the Full Displacement Vector of the Earth's Surface and Man-Made Objects Using Radar Satellite Interferometry for Oil and Gas Field Development Areas. *Geofizicheskie Issledovaniya*. 2012. No. 13(3). P. 5–17 (In Russ.).
 19. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Smolyaninova E.I., Dmitriev P.N., Golubev V.I., Timoshkina E.P., Khayretdinov S.A. Radar Satellite Interferometry: New Technologies for Satellite Monitoring of Mining Areas, Displacements of Natural and Man-Made Objects. *Nauka i Tekhnologicheskie Razrabotki*. 2016. No. 95(3). P. 5–11 (In Russ.).
 20. Milyukov V.K., Klyachko B.S., Myasnikov A.V., Striganov P.S., Yanin A.F., Vlasov A.N. A Laser Interferometer-Deformograph for Monitoring the Crust Movement. *Instruments and Experimental Techniques*. 2005. No. 48(6). P. 780–795. DOI: 10.1007/s10786-005-0140-9
 21. Milyukov V.K., Kravchuk V.K. Observations of Earth Deformation Spectrum by Laser Interferometer-Deformograph. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 3: Fizika. Astronomiya*. 1996. No. 2. P. 73–78 (In Russ.). Available at: <http://vmu.phys.msu.ru/ru/abstract/1996/2/96-2-073/> (accessed: 20.10.2025).
 22. Monitoring Mining Activity with InSAR Technology. *Geofem*, 2023. Retrieved December 02, 2025, from <https://www.geofem.com/post/monitoring-mining-activity-with-insar-technology>.
 23. Myasnikov A.V. On the Problem of Accounting for the Influence of Meteorological Factors on Large Precision Systems Using the Example of the Baksan Large-Base Laser Interferometer. *Seismic Instruments*. 2019. No. 55(2). P. 27–38 (In Russ.). DOI: 10.21455/si2019.2-2
 24. Leveraging InSAR Technology to Optimize Lidar Data Collection. *LiDAR Magazine*, 2025. Retrieved October 23, 2025, from <https://lidarmag.com/2025/08/30/leveraging-insar-technology-to-optimize-lidar-data-collection/>.
 25. Life Cycle Mining Deformation Monitoring and Analysis Using InSAR. *Remote Sensing*, 2024. Retrieved December 02, 2025, from <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/13/2335>.
 26. Operational Mine Monitoring with InSAR. *Australian Centre for Geomechanics*, 2016. Retrieved December 01, 2025, from https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1604_48_Taylor/.

27. Potential and limits of InSAR data for building reconstruction in built-up areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2003. Retrieved October 21, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924271603000212>.
28. Practical Application of InSAR for Slope Performance Monitoring. *Engineering Geology*, 2021. Retrieved February 02, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013795221003379>.
29. Using Advanced InSAR Techniques as a Remote Tool for Mine Site Monitoring. *Tre Altamira*, 2015. Retrieved December 01, 2025, from https://site.tre-altamira.com/wp-content/uploads/2015_InSAR_mine-site_monitoring.pdf.
30. Utilizing InSAR for Surface Stability Monitoring in Mining Sites. *ISPRS Archives*, 2024. Retrieved December 02, 2025, from <https://isprs-archives.com/papers/XLVIII-1-2024/523/2024/isprs-archives-XLVIII-1-2024-523-2024.pdf>.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

А.А. Анженко — концепция и дизайн исследования; теоретическое обоснование применения технологии InSAR, в особенности метода SBAS-InSAR, для геодинамического мониторинга объектов горнодобывающей промышленности; разработка математических моделей для оценки деформационных процессов (выражения (1)–(7), (14), включая модель экспоненциального затухания деформаций (5) и интегральную модель взвешенного усреднения (6); проведение сравнительного анализа методов DInSAR, PS-InSAR и SBAS-InSAR; систематизация практического опыта применения InSAR на международных и отечественных объектах (Кузбасс, Казахстан, Австралия, Китай); формулировка ключевых областей применения и критериев деформационной опасности (табл. 1, 2); анализ экономической эффективности внедрения InSAR (выражения (8), (9), табл. 4); разработка рекомендаций по адаптации технологии к условиям Российской Федерации, включая поправки на климатические условия и вечную мерзлоту (выражения (9), (10)); написание и редактирование основного текста статьи; общее руководство проектом.

А.В. Анженко — методологическая поддержка исследования; анализ и систематизация нормативной базы и требований к геотехническому мониторингу в горнодобывающей отрасли; разработка рекомендаций по созданию гибридных систем мониторинга, интегрирующих данные InSAR с наземными сенсорными сетями (IoT) и технологиями искусственного интеллекта (ИИ); формулировка перспективных направлений развития технологии, включая использование группировок малых спутников (CubeSat); участие в анализе организационных барьеров внедрения InSAR на предприятиях РФ и разработке предложений по подготовке квалифицированных кадров; редакторская правка и согласование окончательного варианта текста статьи.

Artem A. Anzhenko — research conception and design; theoretical justification for the application of InSAR technology, especially the SBAS-InSAR method, for geodynamic monitoring of mining facilities; development of mathematical models for assessing deformation processes (Formulas (1)–(7), (14)), including the exponential decay model of deformations (5) and the integrated weighted averaging model (6); conducting a comparative analysis of DInSAR, PS-InSAR, and SBAS-InSAR methods; systematization of practical experience in applying InSAR at international and domestic sites (Kuzbass, Kazakhstan, Australia, China); formulation of key application areas and deformation hazard criteria (Tables 1, 2); analysis of the economic efficiency of InSAR implementation (Formulas (8), (9), Table 4); development of recommendations for adapting the technology to the conditions of the Russian Federation, including adjustments for climatic conditions and permafrost (Formulas (9), (10)); writing and editing the main text of the article; overall project supervision.

Alexander V. Anzhenko — methodological support for the research; analysis and systematization of the regulatory framework and requirements for geotechnical monitoring in the mining industry; development of recommendations for creating hybrid monitoring systems integrating InSAR data with ground-based sensor networks (IoT) and artificial intelligence (AI) technologies; formulation of promising directions for technology development, including the use of small satellite constellations (CubeSat); participation in the analysis of organizational barriers to InSAR implementation at Russian enterprises and development of proposals for training qualified personnel; editorial revision and approval of the final version of the article text.

ТЕХНИКА ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ / GEOLOGICAL EXPLORATION TECHNIQUES

С.В. Серебряков — сбор и анализ эмпирических данных по практическим кейсам применения InSAR; верификация точности данных InSAR путем сопоставления с результатами наземных геодезических измерений (раздел «Анализ практической эффективности на основе практических примеров (кейсов)»); участие в разработке модели интеграции данных (табл. 3) и оценке весовых коэффициентов для гибридных систем мониторинга; анализ технических и методических ограничений технологии, включая влияние атмосферных помех и проблем интеграции с существующими системами контроля; подготовка графических материалов и таблиц; критический анализ литературных источников; участие в написании разделов «Материалы и методы» и «Результаты».

Sergey V. Serebryakov — collection and analysis of empirical data on practical case studies of InSAR application; verification of InSAR data accuracy by comparison with results from ground-based geodetic measurements (section «Analysis of practical effectiveness based on case studies»); participation in the development of the data integration model (Table 3) and assessment of weighting coefficients for hybrid monitoring systems; analysis of technical and methodological limitations of the technology, including the impact of atmospheric interference and problems of integration with existing control systems; preparation of graphical materials and tables; critical analysis of literature sources; participation in writing the «Materials and Methods» and «Results» sections.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анженко Артем Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной кибербезопасности и защиты геоданных (ПКИЗГ) ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе». 23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия e-mail: anzhenkoaa@mgri.ru тел.: +7 (915) 488-97-33 SPIN-код: 5532-6386 ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6872-8021>

Artem A. Anzhenko — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. of the Department of Industrial Cybersecurity and Geodata Protection, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI). 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia e-mail: anzhenkoaa@mgri.ru tel.: +7 (915) 488-97-33 SPIN-code: 5532-6386 ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6872-8021>

Анженко Александр Васильевич — кандидат технических наук, доцент кафедры экономики минерально-сырьевого комплекса (ЭМСК) ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе». 23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия e-mail: anzhenkoav@mgri.ru тел.: +7 (926) 882-98-99 SPIN-код: 3969-6144 ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1862-4629>

Alexander V. Anzhenko — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. of the Department of Economics of the Mineral Resource Complex, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI). 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia e-mail: anzhenkoav@mgri.ru tel.: +7 (926) 882-98-99 SPIN-code: 3969-6144 ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1862-4629>

Серебряков Сергей Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры управления недвижимостью и развитием территорий ФГБОУ ВО «Московского государственного университета геодезии и картографии»; генеральный директор АО «Оператор пространственных данных сервисов». Лауреат премии им. Ф.Н. Красовского (2005 г.). Почетный геодезист. 16а, ул. Лефортовский Вал, г. Москва 111250, Россия e-mail: serebryakovsv@mgri.ru тел.: +7 (985) 303-50-90 Author ID: 148768 ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1387-6478>

Sergey V. Serebryakov — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. of the Department of Real Estate Management and Territory Development at Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAIK); General Director of Operator of Spatial Data and Services JSC. Laureate of the F.N. Krasovsky Prize (2005). Honorary Surveyor. 16A, Lefortovsky Val str., Moscow 111250, Russia e-mail: serebryakovsv@mgri.ru tel.: +7 (985) 303-50-90 Author ID: 148768 ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1387-6478>