

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ БОРТА КАРЬЕРА МЕТОДОМ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

С.Ю. Новоженин¹, Д.А. Илюхин¹, Т.С. Федоров², Я.А. Волкова³

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Novozhenin_SYu@pers.spmi.ru

² Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Целью исследования является анализ результатов расчета смещений земной поверхности прибортовой зоны карьера по открытым данным радарной интерферометрии и исследование особенностей применения данного метода в целях проведения мониторинга смещений борта крупного карьера. Для оценки смещений земной поверхности прибортовой зоны карьера была получена и обработана серия радарных спутниковых снимков с космического аппарата Sentinel 1-A, находящихся в открытом доступе. Исходными данными для исследования послужили 17 снимков, выполненных с интервалом в 12 дней в бесснежный период с 11.03.2023 по 19.09.2023. Для обработки данных использовался специализированный программный комплекс SNAP. В основе расчета смещений земной поверхности прибортовой зоны карьера лежат методы дифференциальной интерферометрии DinSAR и интерферометрии постоянных отражателей PS с обработкой на основе алгоритма STAMPS. На основе обработки снимков выделена зона борта карьера, где локализованы наибольшие смещения. Выполнено сравнение смещений поверхности, полученных методом DinSAR, при составлении интерферометрических пар в разных временных интервалах. Проведена оценка изменчивости показателя смещений пиксела на участке борта карьера, на основании которой определен оптимальный временной интервал между снимками.

Ключевые слова: открытые горные работы, карьер, мониторинг, смещение, спутниковое зондирование, спутниковая радарная интерферометрия, метод DinSAR, метод постоянных отражателей.

Благодарность: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2023-0002 Фундаментальные междисциплинарные исследования недр Земли и процессов комплексного освоения георесурсов).

Для цитирования: Новоженин С. Ю., Илюхин Д. А., Федоров Т. С., Волкова Я. А. Анализ результатов дистанционного зондирования борта карьера методом радарной интерферометрии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 10. – С. 97–111. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_10_0_97.

Analysis of remote imaging of pitwall using interferometric radar technique

S.Yu. Novozhenin¹, D.A. Ilyukhin¹, T.S. Fedorov², J.A. Volkova³

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Novozhenin_SYu@pers.spmi.ru

² Saint-Petersburg, Russia

³ Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia

Abstract: The research aims at the analysis of calculated displacements of ground surface at open pitwall using the open-access data of the synthetic aperture radar with the examination of features of this method for the purpose of large pitwall displacement monitoring. For the ground surface displacement assessment at pitwall, the accessible series of Sentinel 1-A satellite images were collected and processed. The source data were 17 images taken at an interval of 12 days in the snowless season between March 11 and September 19 in 2023. The data processing used special software system SNAP. The ground surface displacement estimation at the pitwall used the methods of differential interferometry DInSar and persistent scatter (PS) interferometry in combination with the STAMPS algorithm. The image processing allowed detecting a pitwall zone with the largest displacements. The DInSAR results are compared by collating the interferometric pairs acquired at different times. The variability of the pixel displacement on a site of the pitwall is evaluated, and the optimized time period between images is determined on this basis.

Key words: open pit mining, open pit mine, monitoring, displacement, remote sensing, satellite radar interferometry, DInSAR, persistent scatter interferometry.

Acknowledgements: The study was carried out in the framework of the state contract with the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Contract No. FSRW-2023-0002 Basic Interdisciplinary Research of Subsoil and Integrated Management of Georesources.

For citation: Novozhenin S. Yu., Ilyukhin D. A., Fedorov T. S., Volkova J. A. Analysis of remote imaging of pitwall using interferometric radar technique. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(10):97-111. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_10_0_97.

Введение

Повышение эффективности и безопасности открытых горных работ является актуальной задачей в условиях интенсификации добычных процессов [1–3]. С совершенствованием технологий ведения добычных работ и повышением скорости транспортировки полезных ископаемых [4–6] увеличиваются размеры и глубина открытых горных выработок. Вместе с тем повышаются и требования к обеспечению безопасности ведения горных работ [7–9]. Оценке устойчивости бортов карьеров посвя-

щены многие работы отечественных [10–12] и зарубежных [13–15] авторов. Перспективным инструментом наблюдения и оценки состояния горных работ в настоящее время являются спутниковые съемки [16–18]. По многовременным мультиспектральным снимкам, полученным с применением оптико-электронных сканеров, можно оценить темпы развития горных работ и определить объемы добычи [19–21]. Следует отметить, что такие снимки характеризуются высоким пространственным

разрешением, которое при съемке в панхроматическом режиме может достигать первых сантиметров. Другим важным направлением в области дистанционного зондирования Земли является спутниковая радарная интерферометрия [22–24]. В совокупности с натурными маркшейдерскими наблюдениями этот метод эффективно применяется для оценки сдвижений земной поверхности прибортовой зоны карьера [25–27]. В условиях высокой стоимости данных спутниковых съемок, а иногда и полного отсутствия доступа необходимо оптимизировать подход к оценке данных дистанционного зондирования.

Методы

В рамках данной работы была выполнена обработка серии радарных снимков с целью определения сдвижений земной поверхности прибортовой зоны крупного железорудного карьера. В качестве исходных данных выступали снимки, полученные космическим аппаратом Sentinel 1A. Данные съемок указанных космических аппаратов широко используются в отечественной и зарубежной практике [28–30]. В связи с тем, что доступ к данным программы Copernicus и космических аппаратов Sentinel (<https://dataspace.copernicus.eu>) пользователям из России в настоящий момент ограничен, для получения снимков был использован сервис ASF Data

Search. На этом ресурсе после регистрации доступны не только упомянутые данные, но и снимки, полученные с других спутниковых систем.

Поскольку метод радарной интерферометрии целесообразно применять в бесснежный период, для анализа были выбраны 17 снимков, сделанных в период с 11.03.2023 по 19.09.2023. Интервал между повторными съемками для данного космического аппарата составлял 12 дней. Формат полученных снимков – SLC (Single Look Complex). Даты снимков вместе с информацией о смещениях, произошедших между ними, представлены в табл. 1.

Обработка снимков методом дифференциальной интерферометрии DinSAR производилась в программном комплексе SNAP (рис. 1).

Операции обработки снимков включали стандартные для метода дифференциальной интерферометрии этапы [31–33]:

- загрузка пары снимков;
- процедура выбора интересующего участка на снимке – S1 TOPS Split. Необходимость этой операции, как и операции S-1 TOPS Deburst, продиктована особенностями исходных данных. Изначально снимок в формате SLC и интерферометрического широкозахватного класса съемки Interferometric Wide Swath (IW) представляет собой три вытянутых участка, каждый из которых

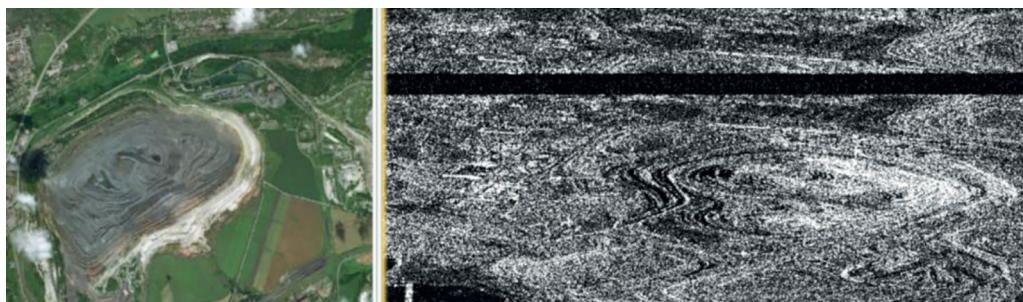


Рис. 1. Карьер на оптическом и радарном снимках [составлено авторами]

Fig. 1. Quarry on optical and radar images [compiled by the authors]

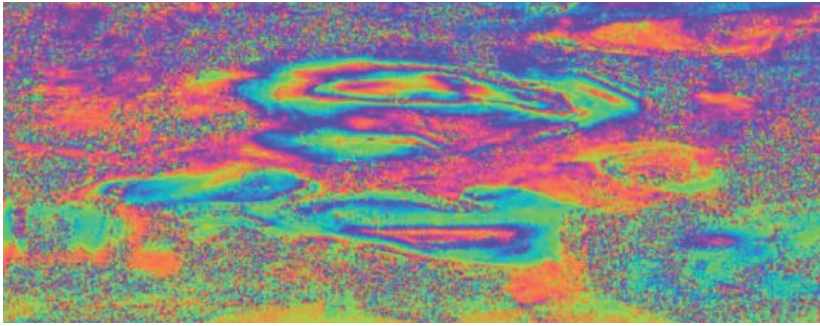


Рис. 2. Фазовая интерферограмма карьера [составлено авторами]
 Fig. 2. Phase interferogram of a quarry [compiled by the authors]

разделен на 9 зон. На этом этапе указываются для последующей обработки участки сцены, содержащие рассматриваемый карьер, и производится объединение фрагментов в одно изображение;

- корегистрация снимков;
- загрузка файла орбиты (Apply Orbit File);
- геокодирование (S1 Back Geocoding) с использованием автоматически загружаемой цифровой модели рельефа STRM 1Sec HGT;
- объединение элементов снимка (S-1 TOPS Deburst) для устранения горизонтальных черных полос между частями снимка.

Построенная по паре снимков интерферограмма представлена на рис. 2.

На следующем этапе производилось удаление топографической фазы, для того чтобы результирующая интерферограмма содержала информацию только о смещении земной поверхности приборной зоны карьера в интервале между съемками. Затем выполнялись операции развертки фазы и пересчет фазы в смещения. Заключительным этапом являлось проведение геометрической коррекции для устранения геометрических искажений и приведения снимка в картографическую проекцию WGS-84. Результат обработки пары снимков в

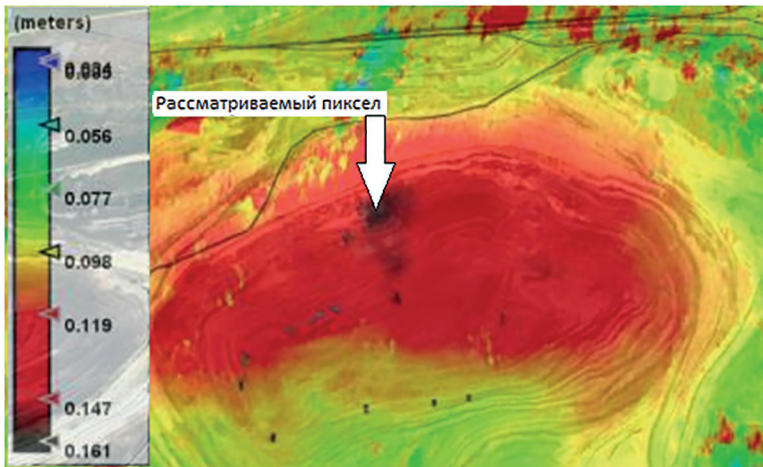


Рис. 3. Карта смещений, полученная методом дифференциальной интерферометрии [составлено авторами]

Fig. 3. Displacement map obtained using the DInSAR method [compiled by the authors]

виде карты смещений в формате KMZ, наложенный на изображение земной поверхности прибортовой зоны карьера в Google Earth, показан на рис. 3. Для последующего сравнения результатов выбрана точка в центре области наибольших смещений.

Идея исследования заключается в сравнении разных комбинаций замыкания цепочек обработанных пар снимков. Первоначально были обработаны 16 пар снимков со строго последовательной компоновкой интерферограмм (интервал между съемками составляет 12 дней). Затем для выявления особенностей обработки данных и оценки точности результатов была произведена обработка снимков с компоновкой интерферометрических пар через 1 снимок (т.е. совместно были обработаны первый и третий снимки, третий и пятый снимки и т.д.). Временной интервал при этом составлял 24 дня. Аналогичным образом составлены пары с временным интервалом 48 дней.

Другим направлением исследования является обработка этой же серии снимков с применением метода постоянных отражателей, реализованного в алгоритме STAMPS [34–36].

Результаты

Результаты применения метода постоянных отражателей, реализованного в алгоритме STAMPS, получились непоказательными: в рассматриваемой области не было выделено постоянных отражателей радиолокационного сигнала, что свидетельствует о декорреляции между снимками при повторных съемках (рис. 4).

Причиной этого явления можно считать активное изменение характера отражающей поверхности. В связи с этим обработка снимков и дальнейший анализ проводились с использованием метода DinSAR.

В результате сравнительного анализа полученных результатов была определена область наибольших смещений земной поверхности прибортовой зоны карьера. Эта область находится в верхней части северного борта рассматриваемого карьера. Количественный анализ и сравнение смещений по интерферометрическим парам выполнялись для указанной области с координатной привязкой по пикселу с наибольшим значением смещения и высокой когерентностью (0,8–0,9). Полученные данные представлены в табл. 1.

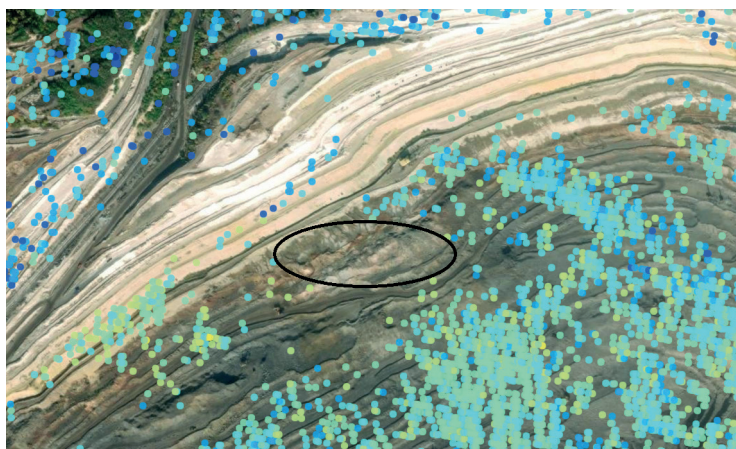


Рис. 4. Карта смещений, построенная методом постоянных отражателей [составлено авторами]

Fig. 4. Displacement map obtained using the persistent scatterers method [compiled by the authors]

Таблица 1

Величины смещений
Displacement values

Вариант 1 – 12 дней			
Даты снимков	Смещение, м	Даты снимков	Смещение, м
11.03.2023		15.06.2023	
	-0,018		0,071
23.03.2023		27.06.2023	
	-0,037		-0,283
04.04.2023		09.07.2023	
	0,031		0,000
16.04.2023		21.07.2023	
	-0,011		0,045
28.04.2023		02.08.2023	
	-0,116		-0,021
10.05.2023		14.08.2023	
	-0,054		-0,056
22.05.2023		26.08.2023	
	0,004		-0,085
03.06.2023		07.09.2023	
	0,019		0,015
15.06.2023		19.09.2023	
		Σ	-0,495

Вариант 2 – 24 дня		Вариант 3 – 48 дней		Вариант 4 – 192 дня	
Даты снимков	Смещение, м	Даты снимков	Смещение, м	Даты снимков	Смещение, м
11.03.2023		11.03.2023		11.03.2023	
	-0,018		-0,037		-0,587
04.04.2023		28.04.2023		19.09.2023	
	-0,010		-0,128	Σ	-0,587
28.04.2023		15.06.2023			
	-0,159		0,126		
22.05.2023		02.08.2023			
	0,022		-0,554		
15.06.2023		19.09.2023			
	-0,027	Σ	-0,594		
09.07.2023					
	0,129				
02.08.2023					
	-0,271				
26.08.2023					
	-0,239				
19.09.2023					
Σ	-0,573				

В результате были определены накопленные за весь анализируемый период смещения земной поверхности прибортовой зоны карьера. Высокая сходимость накопленных смещений свидетельствует о надежности полученных результатов. Стоит отметить, что похожие смещения получены по паре из начального и конечного снимков серии (интервал составил 192 дня). Из этого можно сделать вывод, что итоговое накопленное смещение можно получить по результатам обработки удаленных во времени снимков. Но для более детального анализа необходимо использовать промежуточные снимки.

Для дальнейшей обработки были выбраны результаты трех основных вариантов расчетов — с временными интервалами 12, 24 и 48 дней (рис. 5). По вертикальной оси указаны величины смещений, по горизонтальной — номер снимка. Соответственно, маркеры на линии смещений отмечают середину рассматриваемого временного интервала в обозначениях порядкового номера снимка. Первый маркер на желтом графике (снимки с интервалом 12 дней) — смещение между снимками № 1 и № 2, первый маркер на оранжевом графике (интервал 24 дня) — смещение между снимками № 1 и № 3, первый маркер на серой кривой — смещение между сним-

ками № 1 и № 5 (интервал 48 дней). Из графика видно, что при увеличении временного интервала кривые сглаживаются. Основная часть оседаний происходит в правой части графика, начиная с десятого снимка, соответствующего началу июля 2023 г.

Далее была произведена оценка характера изменчивости для каждой кривой для определения оптимального интервала между съемками. Для этого в программном комплексе Mathcad при помощи кубического сплайна были построены графики зависимости смещения земной поверхности прибортовой зоны карьера от номера снимка для каждого из вариантов (рис. 6).

Затем было найдено максимальное и минимальное значение для обоих вариантов графиков ($\max f(x) = 0,102$, $\min f(x) = -0,285$), после чего были рассчитаны коэффициенты изменчивости (μ) показателя смещений (D — гипотенуза прямоугольного треугольника с катетами L и R ; L — длина горизонтальной проекции кривой, R — размах реализации, т.е. разность максимального и минимального значений смещений, μ_l — масштаб по оси интервалов, μ_c — масштаб по оси значений смещений):

$$D = \sqrt{(\mu_l L)^2 + (\mu_c R)^2}, \quad (1)$$

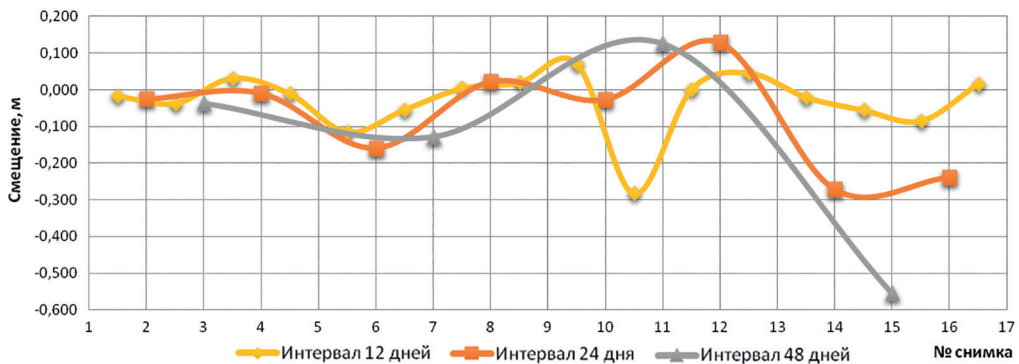


Рис. 5. Смещения по снимкам с различными интервалами [составлено авторами]

Fig. 5. Displacements in images with different intervals [compiled by the authors]

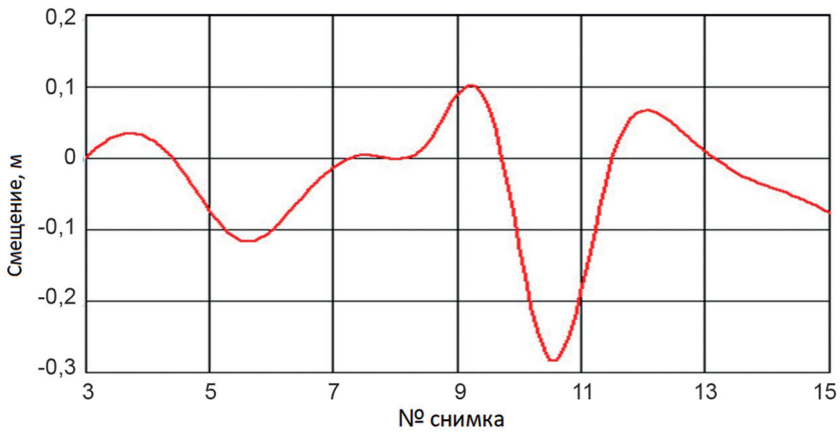


Рис. 6. График смещений для одного интервала [составлено авторами]
 Fig. 6. Displacement graph for one interval [compiled by the authors]

$$u = \int_k \frac{dx}{D} - 1. \quad (2)$$

Аналогичные операции проделаны для всех наборов данных по интервалам. Затем аппроксимируем все рассчитанные коэффициенты изменчивости при помощи гиперболической функции, для этого вычислены некоторые компоненты для определения коэффициентов гиперболического уравнения (табл. 2).

На следующем шаге были рассчитаны коэффициенты гиперболического уравнения по формулам

$$\begin{cases} a = \frac{\sum u * \sum x^2 - \sum x * \sum xu}{n * \sum x^2 - \sum x * \sum x} \\ b = \frac{n * \sum xu - \sum x * \sum u}{n * \sum x^2 - \sum x * \sum x} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = \frac{13,026 * 7200 - 216 * 373,291}{8 * 7200 - 216 * 216} \\ b = \frac{8 * 373,291 - 216 * 13,026}{8 * 7200 - 216 * 216} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = 1,202 \\ b = 0,016 \end{cases} \quad (3)$$

Таблица 2

Расчет компонентов для определения коэффициентов гиперболического уравнения
Calculation of components for determining the coefficients of a hyperbolic equation

Частота снимков (x)	Коэффициент изменчивости (u)	x ²	x * u
12	1,281	144	15,372
12	1,665	144	19,980
24	2,003	576	48,072
24	2,003	576	48,072
24	0,952	576	22,848
24	1,120	576	26,880
48	2,059	2304	98,832
48	1,941	2304	93,168
Σx = 216	Σu = 13,026	Σx ² = 7200	Σx*u = 373,291



Рис. 7. График определения оптимального интервала съемки [составлено авторами]
 Fig. 7. Graph for determining the optimal remote sensing interval [compiled by the authors]

Затем был построен график гиперболической функции следующего вида (рис. 7):

$$y = a + \frac{b}{x} \quad (4)$$

Зная коэффициенты гиперболического уравнения, можно определить точку перегиба графика, которая показывает оптимальное значение частоты снимков, по формуле

$$\begin{aligned} x_0 &= b\sqrt{2} = 0,016\sqrt{2} \approx \\ &\approx 0,022 \Rightarrow \frac{1}{x_0} \approx 44,8 \approx 45 \end{aligned} \quad (5)$$

Анализ результатов

Как можно видеть, оптимальный интервал между повторными снимками, который дает наилучшее отношение значения коэффициента изменчивости к интервалу между снимками, составил 45 дней. Таким образом, можно сделать вывод, что для наблюдения за процессом сдвижения на данном предприятии достаточно будет анализировать снимки с соответствующим интервалом, что уменьшит объем и трудоемкость обработки данных.

Средняя квадратическая погрешность определения полных смещений по ре-

зультатам съемки в данном примере, рассчитанная по данным табл. 1, составила 0,040 м, что не удовлетворяет требованиям ФНиП «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов», 2020 г. Следовательно, данную спутниковую технологию нельзя рассматривать в качестве метода инструментальных наблюдений для мониторинга сдвижений прибортовой зоны карьера. Но ее можно использовать для получения дополнительных данных о смещении поверхности, а также для замены визуального наблюдения и определения участков, за которыми нужно организовать инструментальный контроль высокоточными геодезическими методами.

Следует отметить, что полученная величина соответствует интенсивности процессов на рассматриваемом объекте, поскольку определена по изменчивости конкретных величин смещений. В других горно-геологических условиях, определяющих иной характер и интенсивность геомеханических процессов, оптимальный интервал может меняться. Определить его можно будет по предложенной методике анализа смещений за целый бесснежный сезон.

Заключение

В результате обработки серий снимков методом дифференциальной радарной интерферометрии DinSAR с разными временными интервалами установлено, что для рассмотренных величин сдвижений оптимальный временной интервал между снимками, позволяющий получить показательные данные о смещениях, составляет 45 дней.

Сопоставление результатов исследований с графиком ведения горных работ на карьере показало, что локализованная зона с активными смещениями земной поверхности прибортовой зоны карьера по результатам радарной интерферометрии соответствует области активного ведения горных работ по борту карьера (рыхления массива в результате взрывания). Поэтому можно констатировать, что по результатам обработки данных радарной интерферометрии за

счет значительных площадей исследуемых территорий можно провести как качественный анализ, т.е. локализовать зоны активных изменений поверхности, так и количественный — получить значения смещений в интересующих точках. Косвенно это подтверждается отсутствием выделенных постоянных отражателей радиолокационного сигнала в зоне активных работ. Также следует указать, что использование радарной интерферометрии для получения достоверных данных о смещениях земной поверхности прибортовой зоны карьера возможно только при наличии достоверных результатов натуральных маркшейдерских наблюдений традиционными методами (нивелированием). Многочисленные примеры показывают, что без верификации по опорным точкам данные спутниковой съемки не обладают достаточной достоверностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боос И. Ю., Патачаков И. В., Редькин Д. В. Повышение безопасности открытых горных работ на основе новых знаний о сдвиговых характеристиках и геометрии разрабатываемых недр // Уголь. — 2023. — № 11 (1173). — С. 76–80. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-11-76-80.
2. Кузин А. А., Филиппов В. Г. Метод определения плановых координат и высоты рабочего репера на оползне с принудительными отклонениями вехи от отвесного положения // Геодезия и картография. — 2024. — № 9. — С. 2–11. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1011-9-2-11.
3. Илюхин Д. А., Маринин М. А., Рахманов Д. А. Исследование параметров развала взорванной горной массы фотограмметрическим методом съемки // Горный журнал. — 2023. — № 9. — С. 12–21. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.02.
4. Кузин А. А., Филиппов В. Г. Прогнозирование величин оползневых смещений на основе геодезических данных // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 1176–1191. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1176-1191.
5. Вальков В. А., Виноградов К. П., Валькова Е. О., Мустафин М. Г. Создание растров высокой информативности по данным лазерного сканирования и аэрофотосъемки // Геодезия и картография. — 2022. — № 11. — С. 40–49. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-989-11-40-49.
6. Гусев В. Н., Блищенко А. А., Санникова А. П. Исследование комплекса факторов, оказывающих влияние на погрешность реализации маркшейдерской съемки горных объектов с применением геодезического квадрокоптера // Записки Горного института. — 2022. — Т. 254. — С. 173–179. DOI: 10.31897/PMI.2022.35.
7. Шабаров А. Н., Носков В. А., Павлович А. А., Черепов А. А. Концепция геомеханического риска при открытой добыче полезных ископаемых // Горный журнал. — 2022. — № 9. — С. 22–29. DOI: 10.17580/gzh.2022.09.04.
8. Захаров В. Н., Гвишиани А. Д., Вайсберг Л. А., Жеранов Б. В. Большие данные и устойчивое функционирование геотехнических систем // Горный журнал. — 2021. — № 11. — С. 45–52. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.06.

9. Мустафин М. Г., Валькова Е. О. Маркшейдерско-геомеханическое обоснование методики наблюдений за деформациями бортов карьеров // Уголь. — 2024. — № 7. — С. 55–61. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-55-61.

10. Мустафин М. Г., Валькова Е. О., Вальков В. А. Пути развития маркшейдерско-геодезических наблюдений за устойчивостью бортов карьеров // Маркшейдерский вестник. — 2022. — № 3 (148). — С. 13–18.

11. Волохов А. В. Прогнозная оценка устойчивости бортов карьера // XXI век. Техносферная безопасность. — 2021. — № 2 (22). — С. 201–210. DOI: 10.21285/2500-1582-2021-2-201-210.

12. Глазунов В. В., Бурлуцкий С. Б., Шувалова Р. А., Жданов С. В. Повышение достоверности 3D-моделирования оползневого склона на основе учета данных инженерной геофизики // Записки Горного института. — 2022. — Т. 257. — С. 771–782. DOI: 10.31897/PMI.2022.86.

13. Quelopana A., Navarra A. Integration of strategic open-pit mine planning into hierarchical artificial intelligence // The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2021, vol. 123, pp. 63–70. DOI: 10.17159/2411-9717/1367/2021.

14. McQuillan A., Bar N. The necessity of 3D analysis for open-pit rock slope stability studies: Theory and practice // The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2023, vol. 121, pp. 643–652. DOI: 10.17159/2411-9717/2425/2023.

15. Casagli N., Intriери E., Tofani V., Gigli G. Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques // Nature Reviews Earth & Environment. 2023, vol. 4, no. 1, pp. 51–64. DOI: 10.1038/s43017-022-00373-x.

16. Tong X., Liu X., Chen P., Liu S., Luan K., Li L., Liu S., Liu X., Xie H., Jin Y., Hong Z. Integration of UAV-based photogrammetry and terrestrial laser scanning for the three-dimensional mapping and monitoring of open-pit mine areas // Remote Sensing. 2015, vol. 7, pp. 6635–6662. DOI: 10.3390/rs70606635.

17. Выстрчил М. Г., Гусев В. Н., Сухов А. К. Методика определения погрешностей сегментированных GRID моделей открытых горных выработок, построенных по результатам аэрофото съемки с беспилотного воздушного судна // Записки Горного института. — 2023. — Т. 262. — С. 562–570.

18. Pravdina E. A. Laser scanner data capture time management // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017, vol. 12, no. 5, pp. 1649–1661.

19. Выстрчил М. Г., Балтыжакова Т. И., Романчиков А. Ю., Аникеева А. А. Алгоритм выделения точек земной поверхности из данных воздушного лазерного сканирования // Геодезия и картография. — 2024. — № 2. — С. 2–11. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1004-2-2-11.

20. Ponomarenko M. R., Kutepov Y. I. Using the typification of mining-engineering facilities to substantiate deformation monitoring of opencast mining // Известия УГГУ. — 2020. — № 4 (60). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/using-the-typification-of-mining-engineering-facilities-to-substantiate-deformation-monitoring-of-opencast-mining> (дата обращения: 26.03.2025).

21. Зеньков И. В., Чинь Л. Х., Анищенко Ю. А., Логинова Е. В., Маглинец Ю. А., Раевич К. В., Латынцев А. А., Веретенова Т. А., Кондрашов П. М., Павлова П. Л., Конов В. Н. Исследование горных работ и процессов восстановительной экологии на месторождениях угля во Вьетнаме по данным дистанционного зондирования // Уголь. — 2022. — № 7 (1156). — С. 21–24. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-7-21-24.

22. Hosseiny B., Amini J., Aghababaei H. Structural displacement monitoring using ground-based synthetic aperture radar // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2023, vol. 116, pp. 103–144. DOI: 10.1016/j.jag.2022.103144.

23. Долгополов Д. В., Баборыкин М. Ю., Мелкий В. А. Мониторинг опасных геологических процессов при строительстве и эксплуатации объектов трубопроводного транспорта по данным дистанционного зондирования Земли // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2021. — Т. 4. — № 1. — С. 25–32. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-25-32.

24. Li J., Pei Y., Zhao S., Xiao R., Sang X., Zhang C. A review of remote sensing for environmental monitoring in China // Remote Sensing. 2020, vol. 12, no. 7, pp. 11–30. DOI: 10.3390/rs12071130.

25. Смольянинова Е. И., Михайлов В. О., Дмитриев П. Н. Выявление и мониторинг областей активных деформаций в Адлерском районе Большого Сочи путем анализа серий разночастотных спутниковых радарных снимков за 2007–2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2021. — Т. 18. — № 4. — С. 55. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-55-65.

26. Солонько Е. В., Хлебникова Е. П. Использование разновременных космических снимков для оценки развития оползневых процессов на территории города Барнаула // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2016. – № 9. – С. 156–161.
27. Fan B., Luo G., Hellwich O., Shi X., Ochege F. U. Surface deformation detection and attribution in the Mountain-Oasis-Desert Landscape in north Tianshan Mountains // *GIScience & Remote Sensing*. 2023, vol. 60, no. 1, pp. 72–84. DOI: 10.1080/15481603.2023.2270814.
28. Schubert A., Small D., Miranda N., Geudtner D. Sentinel-1A product geolocation accuracy: Commissioning phase results // *Remote Sensing*. 2015, vol. 7, no. 7, pp. 431–449. DOI: DOI: 10.3390/rs70709431.
29. Mammadov E., Nowosad J., Glaesser C. Estimation and mapping of surface soil properties in the Caucasus Mountains, Azerbaijan using high-resolution remote sensing data // *Geoderma Regional*. 2021, vol. 26, pp. 4–11. DOI: 10.1016/j.geodrs.2021.e00411.
30. Mohamed M. T. A., Al-Naimi L. S., Mgbеojedo T. I., Agoha C. C. Geological mapping and mineral prospectivity using remote sensing and GIS in parts of Hamissana, Northeast Sudan // *Journal of Petroleum Exploration and Production*. 2021, vol. 11, no. 3, pp. 1123–1138. DOI: 10.1007/s13202-021-01115-3.
31. Shirmard H., Farahbakhsh E., Muller D., Chandra R. A review of machine learning in processing remote sensing data for mineral exploration // *Remote Sensing of Environment*. 2022, vol. 268, pp. 11–27. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112750.
32. Zhang B., Wu Y., Zhao B., Chanussot J. Progress and challenges in intelligent remote sensing satellite systems // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2022, vol. 15, pp. 1814–1822. DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3148139.
33. Foxall B., Sweeney J. J., Walter W. R. Identification of mine collapses, explosions and earthquakes using InSAR: a preliminary investigation. Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), Livermore, CA (United States), 1998, no. UCRL-JC-131189.
34. Zhang H., Dang X., Zhao J., Lu M. Analysis and prediction of ground deformation in Yinxi Industrial Park based on time-series InSAR technology // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2024, vol. 196, no. 4, article 359. DOI: 10.1007/s10661-024-12530-4.
35. Vadivel S. K. P., Kim D., Kim Y. C. Time-series InSAR analysis and post-processing using ISCE-StaMPS package for measuring bridge displacements // *Korean Journal of Remote Sensing*. 2020, vol. 36, no. 4, pp. 527–534. DOI: 10.7780/kjrs.2020.36.4.3.
36. Jiang Y., Yu X. Space-based long term condition monitoring of cold region pavement with PS-InSAR // *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*. 2025, vol. 6, no. 1, pp. 1–16. DOI: 10.1186/s43065-024-00110-2. **PLoS**

REFERENCES

1. Boos I. Yu., Patachakov I. V., Redkin D. V. Improving the safety of open-pit mining based on new knowledge about the shear characteristics and geometry of the developed subsoil. *Ugol'*. 2023, no. 11 (1173), pp. 76–80. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-11-76-80.
2. Kuzin A. A., Filippov V. G. Method for determining the plan view coordinates and height of the working benchmark on a landslide with forced inclinations of the pole from the plumb position. *Geodesy and Cartography*. 2024, no. 9, pp. 2–11. [In Russ]. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1011-9-2-11.
3. Ilyukhin D. A., Marinin M. A., Rakhmanov D. A. Investigation of the parameters of the collapse of an exploded rock mass by the photogrammetric survey. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 9, pp. 12–21. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.02.
4. Kuzin A. A., Filippov V. G. Forecasting landslide displacement values based on geodetic data. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 3, pp. 1176–1191. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1176-1191.
5. Valkov V. A., Vinogradov K. P., Valkova E. O., Mustafin M. G. Creating rasters of high information content based on laser scanning and aerial photography. *Geodesy and Cartography*. 2022, no. 11, pp. 40–49. [In Russ]. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-989-11-40-49.
6. Gusev V. N., Blishchenko A. A., & Sannikova A. P. Study of a complex of factors influencing the error in the implementation of surveying of mountain objects using a geodetic quadcopter. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 254, pp. 173–179. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.35.

7. Shabarov A. N., Noskov V. A., Pavlovich A. A., Cherepov A. A. The concept of geomechanical risk in open mining. *Gornyi Zhurnal*. 2022, no. 9, pp. 22 – 29. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2022.09.04.
8. Zakharov V. N., Gvishiani A. D., Vaisberg L. A., Zhernov B. V. Big data and sustainable functioning of geotechnical systems. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 11, pp. 45 – 52. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.06.
9. Mustafin M. G., Valkova E. O. Surveying and geomechanical substantiation of the methodology for observing deformations of quarry sides. *Ugol'*. 2024, no. 7, pp. 55 – 61. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-55-61.
10. Mustafin M. G., Valkova E. O., Valkov V. A. Ways of development of surveying and geodetic observations for the stability of quarry sides. *Mine Surveying Bulletin*. 2022, no. 3 (148), pp. 13 – 18. [In Russ].
11. Volohov A. V. Predictive assessment of quarry side stability. XXI century. *Technosphere safety*. 2021, no. 2 (22), pp. 201 – 210. [In Russ]. DOI: 10.21285/2500-1582-2021-2-201-210.
12. Glazunov V. V., Burlutsky S. B., Shuvalova R. A., Zhdanov S. V. Improving the reliability of 3D modeling of a landslide slope based on data from engineering geophysics. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 257, pp. 771 – 782. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.86.
13. Quelopana A., Navarra A. Integration of strategic open-pit mine planning into hierarchical artificial intelligence techniques. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2021, vol. 123, pp. 63 – 70. DOI: 10.17159/2411-9717/1367/2021.
14. McQuillan A., Bar N. The necessity of 3D analysis for open-pit rock slope stability studies: Theory and practice. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2023, vol. 121, pp. 643 – 652. DOI: 10.17159/2411-9717/2425/2023.
15. Casagli N., Intrieri E., Tofani V., Gigli G. Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2023, vol. 4, no. 1, pp. 51 – 64. DOI: 10.1038/s43017-022-00373-x.
16. Tong X., Liu X., Chen P., Liu S., Luan K., Li L., Liu S., Liu X., Xie H., Jin Y., Hong Z. Integration of UAV-based photogrammetry and terrestrial laser scanning for the three-dimensional mapping and monitoring of open-pit mine areas. *Remote Sensing*. 2015, vol. 7, pp. 6635 – 6662. DOI: 10.3390/rs70606635.
17. Vystrichil M. G., Gusev V. N., Sukhov A. K. The method of determining the errors of segmented GRID models of open-pit mines constructed with the results of unmanned aerial photogrammetric survey. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 262, pp. 562 – 570. [In Russ].
18. Pravdina E. A. Laser scanner data capture time management. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017, vol. 12, no. 5, pp. 1649 – 1661.
19. Vystrichil M. G., Baltyzhakova T. I., Romanchikov A. Yu., Bogoliubova A. A. Algorithm of land surface points extraction from airborne laser scanning data. *Geodesy and Cartography*. 2024, no. 2, pp. 2 – 11. [In Russ]. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1004-2-2-11.
20. Ponomarenko M. R., Kutepov Y. I. Using the typification of mining-engineering facilities to substantiate deformation monitoring of opencast mining. *News of the Ural State Mining University*. 2020, no. 4 (60), available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/using-the-typification-of-mining-engineering-facilities-to-substantiate-deformation-monitoring-of-opencast-mining> (accessed 26.03.2025).
21. Zenkov I. V., Chin L. H., Anishchenko Yu. A., Loginova E. V., Maglinets Yu. A., Raevich K. V., Latyntsev A. A., Veretenova T. A., Kondrashov P. M., Pavlova P. L., Konov V. N. Study of mining operations and processes of restorative ecology at coal deposits in Vietnam based on remote sensing data. *Ugol'*. 2022, no. 7 (1156), pp. 21 – 24. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-7-21-24.
22. Hosseiny B., Amini J., Aghababaei H. Structural displacement monitoring using ground-based synthetic aperture radar. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2023, vol. 116, pp. 103 – 144. DOI: 10.1016/j.jag.2022.103144.
23. Dolgoplov D. V., Baborykin M. Yu., Melky V. A. Monitoring of hazardous geological processes during the construction and operation of pipeline transport facilities according to Earth remote sensing data. *Interexpo Geo-Siberia*. 2021, vol. 4, no. 1, pp. 25 – 32. [In Russ]. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-25-32.
24. Li J., Pei Y., Zhao S., Xiao R., Sang X., Zhang C. A review of remote sensing for environmental monitoring in China. *Remote Sensing*. 2020, vol. 12, no. 7, pp. 11 – 30. DOI: 10.3390/rs12071130.
25. Smolyaninova E. I., Mikhailov V. O., Dmitriev P. N. Identification and monitoring of areas of active deformations in the Adler region of Greater Sochi by analyzing series of different frequency sa-

tellite radar images for 2007–2020. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2021, vol. 18, no. 4, pp. 55. [In Russ]. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-55-65.

26. Solonko E. V., Khlebnikova E. P. Using multi-temporal satellite images to assess the development of landslide processes in the city of Barnaul. *Interexpo GEO-Siberia*. 2016, no. 9, pp. 156–161. [In Russ].

27. Fan B., Luo G., Hellwich O., Shi X., Ochege F. U. Surface deformation detection and attribution in the Mountain-Oasis-Desert Landscape in north Tianshan Mountains. *GIScience & Remote Sensing*. 2023, vol. 60, no. 1, pp. 72–84. DOI: 10.1080/15481603.2023.2270814.

28. Schubert A., Small D., Miranda N., Geudtner D. Sentinel-1A product geolocation accuracy: Commissioning phase results. *Remote Sensing*. 2015, vol. 7, no. 7, pp. 431–449. DOI: DOI: 10.3390/rs70709431.

29. Mammadov E., Nowosad J., Glaesser C. Estimation and mapping of surface soil properties in the Caucasus Mountains, Azerbaijan using high-resolution remote sensing data. *Geoderma Regional*. 2021, vol. 26, pp. 4–11. DOI: 10.1016/j.geodrs.2021.e00411.

30. Mohamed M. T. A., Al-Naimi L. S., Mgbеojedo T. I., Agoha C. C. Geological mapping and mineral prospectivity using remote sensing and GIS in parts of Hamissana, Northeast Sudan. *Journal of Petroleum Exploration and Production*. 2021, vol. 11, no. 3, pp. 1123–1138. DOI: 10.1007/s13202-021-01115-3.

31. Shirmard H., Farahbakhsh E., Muller D., Chandra R. A review of machine learning in processing remote sensing data for mineral exploration. *Remote Sensing of Environment*. 2022, vol. 268, pp. 11–27. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112750.

32. Zhang B., Wu Y., Zhao B., Chanussot J. Progress and challenges in intelligent remote sensing satellite systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2022, vol. 15, pp. 1814–1822. DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3148139.

33. Foxall B., Sweeney J. J., Walter W. R. *Identification of mine collapses, explosions and earthquakes using InSAR: a preliminary investigation*. Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), Livermore, CA (United States), 1998, no. UCRL-JC-131189.

34. Zhang H., Dang X., Zhao J., Lu M. Analysis and prediction of ground deformation in Yinxi Industrial Park based on time-series InSAR technology. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2024, vol. 196, no. 4, article 359. DOI: 10.1007/s10661-024-12530-4.

35. Vadivel S. K. P., Kim D., Kim Y. C. Time-series InSAR analysis and post-processing using ISCE-StaMPS package for measuring bridge displacements. *Korean Journal of Remote Sensing*. 2020, vol. 36, no. 4, pp. 527–534. DOI: 10.7780/kjrs.2020.36.4.3.

36. Jiang Y., Yu X. Space-based long term condition monitoring of cold region pavement with PS-InSAR. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*. 2025, vol. 6, no. 1, pp. 1–16. DOI: 10.1186/s43065-024-00110-2.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Новоженин Сергей Юрьевич¹ — канд. техн. наук,
доцент, доцент, e-mail: Novozhenin_SYu@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5398-4777,

Илюхин Дмитрий Александрович¹ — канд. техн. наук,
доцент, доцент, e-mail: kmd@spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8469-334X,

Федоров Тимур Сергеевич — Санкт-Петербург,
e-mail: kmd@spmi.ru,

Волкова Яна Александровна — канд. техн. наук,
и.о. зав. кафедрой, Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
e-mail: yavolkova@lan.spbgasu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-6282-2366,

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

Для контактов: Новоженин С.Ю., e-mail: Novozhenin_SYu@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.Yu. Novozhenin¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, Assistant Professor,
e-mail: Novozhenin_SYu@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5398-4777,

D.A. Ilyukhin², Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Assistant Professor, e-mail: kmd@spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8469-334X,

T.S. Fedorov, 199106, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: kmd@spmi.ru,

J.A. Volkova, Cand. Sci. (Eng.), Acting Head of Chair,
Saint-Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering, 190005, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: yavolkova@lan.spbgasu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-6282-2366,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

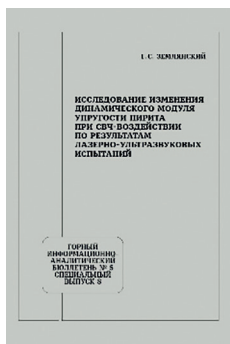
Corresponding author: S.Yu. Novozhenin, e-mail: Novozhenin_SYu@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 19.03.2025; получена после рецензии 28.04.2025; принята к печати 10.09.2025.

Received by the editors 19.03.2025; received after the review 28.04.2025; accepted for printing 10.09.2025.



НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»



Землянский Г. С.

Исследование изменения динамического модуля упругости пирита при СВЧ-воздействии по результатам лазерно-ультразвуковых испытаний: Горный информационно-аналитический бюллетень (специальный выпуск 8).

Год: 2025.

Страниц: 12.

ISSN 0236-1493

Исследованы изменения значений динамического модуля упругости пирита при СВЧ-воздействии по результатам лазерно-ультразвуковых испытаний. Целью работы является косвенное подтверждение результатов предыдущих испытаний СВЧ-воздействия на зерна пирита в кварцево-пиритной руде, показавших существенные изменения их структурного состояния, выразившиеся в росте величины плотности дислокаций на этапе температурной стабилизации, момент наступления которого зависит от среднего размера зерен пирита и концентрации пирита в образце. Представлены основные преимущества лазерно-ультразвукового метода исследований, описано оборудование и методика выполнения ультразвуковых замеров, проведён анализ их результатов. В качестве основного показателя, характеризующего степень изменения структурного состояния зерен пирита, был выбран динамический модуль упругости, значение которого рассчитывалось на основе данных о времени регистрации прихода продольных и поперечных волн. Значение динамического модуля упругости при каждом замере сопоставлялось с соответствующей данной итерации температурой зерна пирита. Выявленные закономерности анализировались и сравнивались с результатами более ранних экспериментов, показавших резкий рост плотности дислокаций в зернах пирита на участке температурной стабилизации.