УДК 528.721.221.6:622.2 DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-2-61-73

## Анализ данных сканирования наземных интерферометрических радаров на объектах открытых горных работ для выявления ложных сигналов

А. А. Шоломицкий<sup>1</sup>, Г. А. Уставич<sup>1</sup>, В. А. Шаворин<sup>1</sup><sup>∞</sup>, Е. В. Ситникова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Карагандинский технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан

## e-mail: shavorinva@yandex.ru

Аннотация. Наземное интерферометрическое сканирование как метод мониторинга бортов и уступов карьеров при открытой разработке полезных ископаемых представляет собой относительно новую технологию для нашей страны. Внедрение и эксплуатация данной технологии на объектах отечественных компаний, а также последующая интерпретация полученных данных сопряжены с рядом трудностей. Одной из ключевых проблем является зашумленность интерферограмм сканирования, что приводит к ложным срабатываниям радаров. В рамках данного исследования был проведен анализ влияния сезонных изменений метеорологических условий на результаты обработки данных интерферометрического сканирования. Представлены основные методы анализа и минимизации влияния метеорологических факторов на точность сканирования. Предложена методика обработки данных интерферометрического сканирования. Выявление и отбраковку ложных срабатываний. Разработанная схема позволяет повысить эффективность обнаружения ложных срабатываний, что способствует повышению безопасности ведения горных работ и снижению непроизводственных простоветвует повышению базопасности ведения.

Ключевые слова: наземное интерферометрическое сканирование, георадар, карьер, геотехнический мониторинг, оползень, деформации, сдвижение

## Для цитирования:

Шоломицкий А. А., Уставич Г. А., Шаворин В. А., Ситникова Е. В. Анализ данных сканирования наземных интерферометрических радаров на объектах открытых горных работ для выявления ложных сигналов // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 2. – С. 61–73. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-2-61-73

#### Введение

В начале 2000-х гг. в рамках поиска эффективной системы за наблюдением откосных сооружений были разработаны радарные установки, обеспечивающие высокоточные непрерывные наблюдения за смещениями. Интерферометрический наземный радар был разработан в Университете Квинсленда (Австралия), специально для использования его на карьерах и разрезах [1]. В настоящее время интерферометрические радары находят широкое применение на предприятиях, осуществляющих разработку полезных ископаемых открытым способом, эффективно решая геомеханические задачи мониторинга деформационных процессов горных работ.

Наземные интерферометрические радары используются для дистанционного мониторинга сдвижений и деформаций требуемого участка борта в режиме реального времени. Преимуществами технологии являются высокая точность измерений, возможность сканирования бортов с большого расстояния, минимальное влияние атмосферной рефракции и отсутствие необходимости размещать отражатели в опасной зоне. Время сканирования заданной области на борту карьера зависит от типа радара, размеров исследуемого участка, расстояния от радара до поверхности борта, плотности сканирования, метеоусловий и варьируется от 2 до 25 минут [2].

В зарубежной практике радары применяются достаточно давно. Первопроходцем в применении наземного интерферометрического сканирования на объектах открытых горных работ стала австралийская компания GroundProbe Ltd., представившая в июне 2003 г. радар стабильности склона (SSR).

В России наземные интерферометрические радары стали применяться только с 2014 г. Одним из первых предприятий, которое ввело данную технологию, стал АО «Ковдорский ГОК», установивший на карьере «Железный» радар компании IDS. К настоящему времени радарная система мониторинга насчитывает уже 4 радара, в числе которых 3 мобильных радара IBIS ArcSAR и 1 стационарный радар IBIS FM. Радары расположены таким образом, что покрывают практически все участки борта карьера «Железный» [3, 4].

Радары итальянской компании IDS располагаются на более чем 120 карьерах по всему миру в количестве более 300 радаров. В России радары компании IDS эксплуатируются такими компаниями, как AO «Ковдорский ГОК», AO «Кузбассразрезуголь», AO «СУЭК-Кузбасс», AO «Михайловский ГОК», AO «Полюс Красноярск», ПАО «АЛРОСА». Всего на объектах российских компаний работают 18 радаров различных модификаций (IBIS-FM, IBIS ArcSAR, Hydra).

Радары южноафриканской компании Reutech в России внедрены на объектах компаний АО «Полюс», Norgold разрез «Березовский».

Радары австралийской компании Ground-Probe (SSR-XT, SSR-FX, SSR-SARX, SSR-OMNI) в России эксплуатируют АО «Полюс», АО «Черниговец», АО «СУЭК-Кузбасс», АО «Полиметалл», АО «Серебро Магадана». В сумме на карьерах отечественных компаний находятся 12 радаров компании GroundProbe (GML) [5, 6].

В последнее время на объектах российских компаний стали внедрять китайские радары CHCNAV. По состоянию на начало 2024 г. в работу внедрено три георадара на двух разрезах Кузбасса [7].

Наземные интерферометрические радары в России отнесены к средствам измерений, что подтверждено приказами Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии [8].

Использование интерферометрических радаров в северных регионах России выявило проблему возникновения ложных сигналов, обусловленных суровыми метеорологическими и гидрогеологическими условиями. Ложные сигналы оказывают негативное влияние на производственный процесс, вызывая необоснованные перемещения персонала и техники, а также увеличивая время простоев оборудования. Анализ причин возникновения ложных сигналов и разработка методов их устранения являются ключевыми факторами снижения уровня непроизводственных простоев в технологических процессах при открытой разработке месторождений. Задача фильтрации ложных сигналов актуальна из-за значительного экономического ущерба от простоя добычного и транспортного оборудования.

#### Методы интерпретации интерферограмм

Одной из распространенных проблем, с которой сталкиваются геомеханики при интерпретации данных интерферометрического сканирования, являются «шумы». Теоретически, принцип действия и конструкция георадара позволяют измерять смещения массива с субмиллиметровой точностью, однако необходимо учитывать, что по сути измерения происходят с помощью отражающихся электромагнитных волн, на которые оказывают влияние множество факторов [9].

К ключевым параметрам, влияющим на качество данных радара, относятся следующие.

1. Перпендикулярность луча радара к наблюдаемому участку.

2. Состояние поверхности участка: обнаженные породы обеспечивают наилучшее качество данных, в то время как растительность и снежный покров могут приводить к «зашумлению» сигнала.

3. Погодные условия, такие как дождь, снег, высокая температура и другие факторы, которые могут влиять на распространение и отражение радиоволн.

Погодные условия являются основным источником «шумов» и наиболее негативно сказываются на получаемых данных. Для уменьшения их влияния используются алгоритмы атмосферной коррекции, которые в той или иной степени способны компенсировать влияние данного фактора, улучшая точность и достоверность результатов интерферометрического сканирования. Чем меньше «шумов», тем выше достоверность анализа и ниже вероятность ложных срабатываний, указывающих на смещение объектов. Данный показатель можно считать одним из ключевых при оценке результатов сканирования радаров различных фирм.

При сравнении систем оповещения в разных программных продуктах необходимо учитывать два основных аспекта. Во-первых, это точность настройки карт опасности. Важно оценить диапазон доступных параметров для настройки (смещения, скорости, ускорения, обнаружение пиковых значений и т. д.), а также возможности задания областей, порогов и интервалов усреднения данных.

Второй значимый фактор – это эффективность системы оповещения и вероятность ложных срабатываний. По своей сути, ложные срабатывания напрямую связаны с «зашумленностью» интерферограмм сканирования (чем больше на интерферограмме «шумов», которые программа интерпретирует как смещение, тем больше ложных срабатываний), тем не менее данный фактор следует рассматривать отдельно, поскольку на ложные срабатывания, помимо «зашумленности», также влияют параметры усреднения и алгоритмы обработки данных.

Изначально радары разрабатывались в экспериментальных условиях, с последующим внедрением в промышленность на небольших карьерах, диаметром не более 400 м. В настоящее время радары сканируют откосы на расстоянии до 5 км, на крупнейших карьерах мира. В этих условиях атмосферная изменчивость достигает такого уровня, что внутри карьера нередко можно выделить несколько зон с различными микроклиматическими условиями.

На рис. 1 изображена схема возможного влияния внешних факторов на результаты сканирования наземного георадара.

Изменение температуры, давления, относительной влажности создает вероятность появления тумана и других климатических изменений, которые в свою очередь приводят к преломлению сигнала и эффекту, называемому рефракцией. Скорость распространения сигнала в различных атмосферных условиях влияет на изменение угла фазы, на основании которой формируется аварийный сигнал.

Разработчиками радаров были разработаны и реализованы различные методы, направленные на снижение уровня шума в данных. Большинство из них основываются на программной модификации алгоритмов обработки сигналов георадаров. К таким методам относится установка метеостанции на радаре, позволяющей вводить поправку за рефракцию в результаты сканирования, алгоритм отслеживания статистического изменения пикселей для классификации областей, подходящих атмосферной коррекции и др. [10]. Единственным методом, который может контролировать сам пользователь в целях минимизации влияния атмосферной рефракции, является создание условных зон устойчивости. Метод позволяет выбрать точки или области в зоне сканирования георадара, которые считаются стабильными, и любое измеренное на них смещение будет интерпретировано как влияние рефракции и может быть скорректировано и экстраполировано на ближайшие области.



Рис. 1. Схема влияния внешних факторов на результаты интерферометрического сканирования

В процессе эксплуатации наземных интерферометрических радаров и интерпретации данных интерферограмм сканирования, как и в любых других областях, важную роль играет человеческий фактор. Решения, принимаемые инженером-геомехаником, напрямую влияют на эффективность системы раннего предупреждения осыпаний и камнепадов. Для минимизации этого влияния необходимо учитывать опыт наблюдений за деформационными процессами, их анализ и накопленную базу данных по деформациям на каждом конкретном месторождении [11]. На рис. 2 приведена схема интерпретации данных интерферометрического сканирования, разработанная авторами статьи.

При обработке данных сканирования, полученных с радара в виде интерферограммы, и выявлении аварийных сигналов важнейшей задачей является их анализ и правильная интерпретация. Срабатывание аварийных сигналов может быть обусловлено неисправностями аппаратного обеспечения или являться геотехническим предупреждением.



Рис. 2. Схема методики обработки данных интерферометрического сканирования

В случае возникновения сбоев в системе связи, отключения электропитания, нарушения работы или аварийной остановки, а также при недостатке свободного места на диске для записи данных, ошибках в работе метеостанции и других вспомогательных датчиков, радар автоматически выдает уведомление о прекращении процесса сканирования и остановке приема данных с радарной системы. Если данное предупреждение не является ошибочным и подтверждается, необходимо выполнить комплекс диагностических процедур для выявления и устранения обнаруженных неисправностей, после чего можно продолжить сканирование.

В случае срабатывания геотехнического предупреждения необходимо установить, является ли обнаруженное смещение в зоне сканирования истинным или ложным. Результаты ложных срабатываний подлежат отбраковке. На вероятность ложного срабатывания могут влиять такие факторы, как работа техники, неблагоприятные метеорологические условия и различные помехи [12, 13].

При подтверждении достоверности срабатывания происходит предупреждение по одному или нескольким критериям, указанным на схеме. Это может быть предупреждение по общей зоне сканирования, по потенциальноопасным участкам, определенных ранее, по графикам скоростей и смещений, по минимальной площади сканирования и еще по ряду факторов.

В этом случае инженер-геомеханик производит анализ данных, расчет и прогноз времени возможного обрушения. При необходимости производится корректировка данных с учетом метеорологических условий и их сопоставление с результатами других методов мониторинга, основанных на использовании роботизированных тахеометров или ГНССтехнологий, при их наличии.

На основании проведенного анализа делается вывод об опасности нестабильного участка и последующие действия по оповещению и выводу людей и техники из опасной зоны.

Вследствие обильных осадков и изменяющихся погодных и атмосферных условий возникают случаи ложных срабатываний и оповещений на воду, снег, лед или туман, смог. Фаза сигнала ( $\varphi$ ) зависит от времени прохождения (t) волны радара

$$\varphi = -2\pi \cdot f(t). \tag{1}$$

Время прохождения волны радара (t), зависит от скорости волны (v), которая для

электромагнитных волн равна скорости света (с), деленной на коэффициент преломления (*n*) среды атмосферы. Таким образом формула для определения времени прохождения волны радара имеет вид:

$$t = n \frac{2 \cdot r}{c}, \qquad (2)$$

где *r* – расстояние от радара до цели.

Изменение фазы  $\Delta \varphi$  равняется смещению цели  $\Delta r$ , которое является полезным показателем для вычисления смещения цели и индексу измерения рефракции  $\Delta n$ , нежелательного показателя из-за изменений атмосферы

$$\Delta \varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta r - \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta n \cdot r , \qquad (3)$$

где λ – длина радарной волны.

Существуют три основные составляющие изменения фазы:

$$\Delta \phi = \Delta \phi_{\text{de}\phi} + \Delta \phi_{\text{aTM}} + \Delta \phi_{\text{IIIYM}}, \qquad (4)$$

где  $\Delta \phi_{\text{деф}}$  – изменение фазы, связанное с движением массива (деформация), что является главным критерием, по которому определяется нестабильность пикселя радарного сканирования;

 $\Delta \phi_{a_{TM}} - изменение фазы, связанное с вли- янием атмосферных явлений;$ 

Δφ<sub>шум</sub> – изменение фазы, вызванное посторонними шумами. При вычислении изменения фазы этим значением пренебрегают.

Задача процесса обработки интерферограммы заключается в расчете и учете атмосферных влияний и удаления их и сценария постобработки, оставляя только смещения.

После этого смещения рассчитываются как

$$d = -\frac{\lambda}{4\pi} \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) \,. \tag{5}$$

Обычно ложные предупреждения несложно идентифицировать и распознать природу их появления, однако бывают случаи, когда влияние осадков и/или атмосферных условий на данные сканирования радара настолько велико, что реальное движение может быть скрыто этими факторами. В этом случае рекомендуется ограничить или остановить работу в потенциально опасной зоне до тех пор, пока данные не вернутся в норму.

Ниже представлены несколько примеров ложных срабатываний радаров, которые могут возникать как из-за метеорологических условий, так и в результате взаимодействия с различными объектами.

В летний период радары иногда регистрируют ложные срабатывания, вызванные нагреванием металлических объектов и фоновым излучением линий электропередач. На рис. 3 показан пример ложного срабатывания в летнее время по скоростному фактору на металлическую трубу. Анализ графика за 1 час показал скорость до 6,2 мм/ч, что можно было ошибочно интерпретировать как движение коренного массива горных пород, и быть предвестником обрушения. Однако визуальный осмотр выявил в этом месте участок вертикального водовода.



Рис. 3. Пример ложного срабатывания на георадаре SSR-XT: *a*) карта когерентности; *б*) карта деформации; *в*) график деформации

Зимой, в условиях интенсивного водопроявления на бортах карьера и активного образования наледи, радар также может демонстрировать увеличение скоростей и смещений. На рис. 4 представлен сильнообводненный участок карьера с глубоким слоем наледи.



Рис. 4. Пример сильнообводненного участка борта в весеннее время

Пример срабатывания георадара на выход воды представлен на рис. 5. На рисунке 5, *а* представлена интерферограмма сканирования радаром Reutech MSR300. На рис. 5, *б* этот же участок карьера отображен в режиме тепловизионной съемки. В местах выхода воды скорости по отдельным пикселям достигали до 2 мм/ч, что также могло быть интерпретировано как возможное смещение горного массива. С помощью видеокамеры, оснащенной тепловизором, удалось легко идентифицировать зоны выхода воды на поверхность.





*a*) интерферограмма сканирования радаром и графики нестабильных точек; *б*) тепловизионная съемка участка

На рис. 6 представлен еще один пример реагирования радара на выход воды на поверхность карьера. На рис. 6, *а* представлена интерферограмма сканирования мобильным радаром IDS Hydra X. На рис. 6, *б* этот же участок карьера изображен в режиме тепловизионной съемки, которая выявила область водопроявления и формирования льда. Смещение по двухчасовому диапазону составляло около 2–3 мм, при этом скорость движения фиксировалась в пике до 2 мм/ч. В данной ситуации крайне важно точно распознать причину наблюдаемого явления, поскольку при реальном увеличении скоростей в данной области могла бы возникнуть угроза для работающей в этой зоне техники.



Рис. 6. Пример фиксирования увеличения скоростей из-за водопроявления георадаром IDS Hydra X в зимнее время:

a) интерферограмма сканирования радаром и графики нестабильной области; б) тепловизионная съемка участка

Добыча полезных ископаемых в России часто ведется в суровых климатических условиях, с обильными осадками в виде снега, который может не таять до девяти месяцев в году. Анализ практического применения радиолокационных методов показал, что снег и лед напрямую влияют на интерпретацию данных сканирования.

Радиолокационные волны способны проникать через снежный покров и отражаться от горного массива. В слое снежного покрова скорость распространения сигнала уменьшается, что приводит к изменению длины волны в меньшую сторону (рис. 7).



Рис. 7. Изменение длины волны из-за слоя снега

В случае, когда слой снега стабилен, радар будет давать надежные результаты, но каждый раз изменение толщины снежного покрова будет влиять на результаты сканирования. При изменении слоя снежного покрова изменится и фаза сигнала:

$$\Delta \varphi = \Delta \varphi_{\text{ge}\varphi} + \Delta \varphi_{\text{aTM}} + \Delta \varphi_{\text{cHer}} \,. \tag{6}$$

Изменение фазы, связанное со слоем снега, можно рассчитать по следующей формуле:

$$\Delta \varphi_{\rm cher} = \frac{4\pi \cdot c \cdot \Delta h_{\rm cher}}{\lambda} \cdot \left(\frac{1}{\nu_{\rm cher}} - \frac{1}{c}\right), \quad (7)$$

где  $\Delta h_{\text{снег}}$  – толщина снежного покрова;

 v<sub>снег</sub> – скорость распространения радиоволн в слое снега;

 $\lambda~-$ длина волны в воздухе;

с – скорость света.

Смещение, являющееся следствием изменения толщины снежного покрова, определяется как

$$\Delta d_{\rm cher} = \Delta h_{\rm cher} \cdot (1 - \frac{c}{v_{\rm cher}}) \,. \tag{8}$$

Подставляя в формулу скорость света  $(3 \cdot 10^8 \text{ м/c})$  и скорость света во льду  $(2,29*10^8 \text{ м/c})$ , получаем измеряемое радаром смещение  $\Delta d_{\text{снег}} = -0,31 \cdot \Delta h_{\text{снег}}$ .

Снег аккумулируется и тает, поэтому смещения, связанные со снегопадом, отличаются от реального смещения борта и могут быть легко интерпретированы опытным инженером-геомехаником [14]. Как видно на рис. 8 и 9, при оттайке борта и в период активного снегопада интерферограммы сканирования показывают похожие результаты. На обоих примерах видны хаотичные зоны увеличение скоростей как в положительную (движение от выработанного пространства – синий цвет), так и в отрицательную (движение в выработанное пространство – красный цвет) стороны в диапазоне от –1 до 1 мм/ч.



Рис. 8. Интерферограмма скорости в период оттайки бортов



Рис. 9. Интерферограмма скорости в период активного снегопада

После анализа результатов интерпретации процессов оттаивания или снегопада, для повышения качества визуализации рекомендуется ввести поправку, увеличив шкалу градиента скорости на несколько миллиметров. Это обеспечит фокусировку на областях, скорость смещения которых превышает установленный порог в шкале, и улучшит анализ интерферограммы.

Атмосферная коррекция в радарах применяется для снижения влияния метеорологических факторов на результаты измерений. Как уже было описано выше, существуют несколько способов минимизации этого влияния:

 с помощью данных метеостанции алгоритмами радара вводятся поправки в измерения;

 – с помощью задания условных зон устойчивости;

 с помощью программной автоматической отбраковки пикселей с низкой когерентностью;

 с помощью алгоритма отслеживания статистического изменения пикселей для классификации областей, подходящих для атмосферной коррекции

и некоторые другие.

Подробно рассмотрим только второй метод, когда пользователь может сам задавать условные зоны устойчивости (УЗУ) ввиду того, что он является базовым. Другие методы являются программными алгоритмами, встроенными в ПО радара производителями, и не поддаются коррекции пользователями.

Базовый способ коррекции атмосферного влияния предполагает определение пользователем стабильных областей, которые являются наземными контрольными точками. Это могут быть как участки стабильных зон бортов карьера, которые геомеханик считает устойчивыми, так и специальные уголковые отражатели. Рекомендуется использовать именно уголковые отражатели, закрепленные на неподвижных пунктах, так как они имеют меньшую вероятность сдвижения, чем даже самые устойчивые участки бортов карьера, сложенные скальными породами.

Коррекция атмосферы осуществляется на основе небольших областей, которые пользователь считает условно стабильными и которые используются в качестве основы для расчета модели компенсации атмосферы. Однако действие стабильных зон будет использоваться алгоритмом обработки радара только в ограниченном диапазоне, где атмосфера изменяется однородно, что в условиях больших карьеров соблюдается далеко не всегда. Модель компенсации атмосферы рассчитывается и обновляется с каждым новым измерением области сканирования, вводя поправки в соответствии с полученными данными.

При использовании уголковых отражателей, они устанавливаются на стабильных участках бортов карьера. Конструкция отражателей и материал изготовления обеспечивают эффективное отражение и высокую амплитуду возвращенного сигнала от радара. Соответственно по результатам сканирования возможно рассчитать поправку за метеоусловия и применять ее на все участки сканирования бортов, выявляя истинное смещение [15].

Пример мест размещения уголковых отражателей на борту карьера представлен на рис. 10.



Рис. 10. Пример мест размещения уголковых отражателей и условных зон устойчивости

На рис. 11 представлены условия, при которых можно считать коррекцию атмосферных явлений качественной. Во-первых, график когерентности должен иметь горизонтальный тренд, близкий к единице. Когерентность характеризует степень соответствия данных сканирования каждого выделенного участка данным предыдущего сканирования. Наличие резких скачков на графике когерентности свидетельствует о наличии атмосферных явлений.

Во-вторых, графики расчета метеостанции и УЗУ (условной зоны устойчивости) должны быть практически идентичны. При этом график расхождения должен быть близок к нулю, что указывает на минимальное отклонение между данными, полученными с метеостанции и рассчитанными по результатам условной зоны устойчивости.



Рис. 11. Пример качественной коррекции атмосферных явлений

На рис. 12 представлен образец некачественной коррекции атмосферных явлений. Анализируя график когерентности, можно выявить нисходящий тренд. Между графиками расчета метеостанции и условной зоны устойчивости (УЗУ) присутствует увеличение вертикальной составляющей, и график расхождения имеет вертикальную составляющую.



Рис. 12. Пример некачественной коррекции атмосферных явлений

Нередко происходят ситуации, когда при работе техники на рабочем горизонте происходит локальная деформация, которая развивается стремительно. Зафиксировать такие деформации георадарами бывает очень сложно, вследствие помех от работающей техники.

Камнепады, клиновидные и планарные деформации в пределах одного уступа в крепких породах характеризуются короткой фазой ускорения перед обрушением, поэтому если частота сканирования больше, чем фаза ускорения, то деформация не может быть обнаружена радаром [16].

Этот вид деформаций не вызывает дополнительных затрат, однако внезапное обрушение рабочего уступа снижает безопасность работы в карьере, и развитие таких деформаций также необходимо сводить к минимуму. Современные решения этой проблемы включают использование радаров SAR совместно с RAR, но без полной замены последних. Радары SAR позволяют сканировать заданный участок за время, равное нескольким десяткам секунд, что уменьшает, но не исключает полностью вероятность незарегистрированной деформации. Так, радар китайского производства CHCNAV и итальянский радар IDS Hydra X способны сканировать участок в 180° за 30 и 40 секунд соответственно.

В период с 01.05.2023 по 31.12.2023 по одному из радаров на производственной площадке было зафиксировано 83 срабатывания. Из общего числа срабатываний 54 предупреждения носили характер сигнализации аппаратного обеспечения радара, указывающие на неисправность или ошибки в работе самого радара. Оставшиеся 29 срабатываний были интерпретированы как геотехнические предупреждения, свидетельствующие о потенциальных изменениях состоянии горного массива. Эти данные представлены на рис. 13.





В результате анализа данных георадара было установлено, что 41 % зарегистрированных срабатываний классифицируются как ложные, т. е. не оказывающие влияние на корректную работу радара в случае аппаратных предупреждений и не подтвердившихся в случае геотехнических предупреждений. Ложные срабатывания обусловлены совокупностью метеорологических и гидрогеологических факторов, характерных для открытых разработок в северных регионах Российской Федерации, а также помехами, вызванными работой техники в карьере.

#### Заключение

В статье выполнен анализ воздействия внешних факторов, таких как метеорологи-

ческие условия, сезонные изменения поверхности сканирования и другие факторы, оказывающие влияние на скорость распространения сигнала и изменение угла фазы, что приводит к снижению корректности отображения данных наземного интерферометрического сканирования. На основе полученных данных разработана методика обработки результатов наземного интерферометрического сканирования, позволяющая выявить ложные сигналы срабатывания геотехнических предупреждений и аппаратного обеспечения георадара.

Предложенная авторами схема значительно повышает точность идентификации ложных срабатываний, что способствует повышению безопасности ведения горных работ и снижению непроизводственных простоев при открытой разработке месторождений.

Отбраковка ложных геотехнических предупреждений является важной задачей, так как приостановка добычных работ прямо пропорционально влияет на экономические показатели эксплуатирующей организации. Так, при простоях в один час экскаватора WK-20 совместно с автосамосвалом Caterpillar 793D на золоторудном карьере предприятие способно терять до 2 млн рублей, не считая простоя буровых станков и вспомогательной техники. Поэтому выделение причин и фильтрация ложных сигналов при интерферометрическом сканировании повышает экономическую эффективность горного производства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dick G. J. Development of an early warning time-of-failure analysis methodology for open pit mine slopes utilizing the spatial distribution of ground-based radar monitoring data // A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of applied science. The University of British Columbia (Vancouver). -2013. -436 p. - DOI 10.1139/cgj-2014-0028.

2. Исмагилов Р. И., Захаров А. Г., Бадтиев Б. П., Сенин Н. В., Павлович А. А., Свириденко А. С. Использование (опыт тестирования) георадара на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере Михайловского ГОКа им. А.В. Варичева // Горная промышленность. – 2020. – № 3. – С. 84–90. – DOI 10.30686/1609-9192-2020-3-84-90. – EDN GDBNKL.

3. Розанов И. Ю., Ковалев Д. А. Результаты анализа данных радарной системы мониторинга устойчивости борта карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-1. – С. 122–133. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2022\_-121 0 122 – EDN JRSFEN.

4. Макаров А. Б., Ананин А. И., Спирин В. И. Радарный мониторинг устойчивости бортов карьеров // Сборник научных трудов ВНИИЦВЕТМЕТА. – 2018. – С 15–28.

5. Шаворин В. А. К вопросу об актуальности импортозамещения в сфере гражданского наземного интерферометрического сканирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIX Международный

научный конгресс, 17–19 мая 2023 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2023. № 1. – С. 154–161. – DOI 10.33764/2618-981Х-2023-1-1-154-161. – EDN SUKGOZ.

6. Бурцев С. В., Рыбак Л. В. Радиолокационные системы контроля устойчивости бортов на разрезе «Черниговец» // Известия ТулГУ. Науки о земле. – 2018. – Вып. 1. – С. 203–209. – EDN YTFXBX.

7. Канаев Э. Д., Брагин А. А. Результаты натурных испытаний геотехнического радара в условиях Сибири // Электронный журнал «Глобус. Геология и бизнес». [Электронный ресурс]. – URL: https://www.vnedra.ru/ tehnika/oborudovanie/rezultaty-naturnyh-ispytanij-geotehnicheskogo-radara-vusloviyah-sibiri-23015/.

8. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. [Электронный pecypc]. – URL: https://fgis.gost.ru/ fundmetrology/registry/17/items/237925.

9. Шаворин В. А., Горилько А. С. Исследование точности систем измерения сдвигов бортов на примере 3D радара Groundprobe SSR-XT // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 1 : Национальная науч. конф. с междунар. участием «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. № 1. – С. 144–151. – DOI 10.33764/2618-981X-2020-1-1-144-151. – EDN EBKNAJ.

10. Cabrejo A., Bellett P., Stickley G., Silva R., Gunaris Y., Pérez J. Risk management and alarming based on a new atmospheric correction algorithm for ground-based radars // PM Dight (ed.), Slope Stability 2020: Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Australian Centre for Geomechanics, Perth. – 2020. – P. 319–338. – DOI 10.36487/ACG repo/2025 17.

11. Shellam R., Coggan J. Analysis of velocity and acceleration trends using slope stability radar to identify failure signatures to better inform deformation trigger action response plans // Slope Stability 2020. Australian Centre for Geomechanics – Perth – 2020. – P. 227–240. – DOI 10.36487/ACG repo/2025 10.

12. Macqeen G. K., Salas E. L., Hutchison B. J. Application of radar monitoring at Savage River Mine, Tasmania // Slope Stability. – 2013. – P. 1011–1020. – DOI 10.36487/ACG\_rep/1308\_70\_Macqueen.

13. Bellet P., Noon D., Leva D., Rivolta C. 3D and 2D radars for open-pit slope monitoring // The Southern African Institute of Mining and Metallurgy Slope Stability. – 2015. – P. 1–14.

14. Niekrasz J., Banda S., Rinne M. Review of radar system performance and estimation of slope deformation threshold values for the Leveaniemi open pit. School of Engineering // Master's thesis. – 2018. – P. 90.

15. Caduff R., Schlunegger F., Kos F., Wiesmann A. A review of terrestrial radar interferometry for measuring surface change in the geosciences. // Earth surface processed and landforms. – 2014. – P. 208–228. – DOI 10.1002/esp.3656.

16. Powell CL., Brockhurst N. Case study: rockfall assessment and mitigation at the Newmont Boddington Gold mine. // SSIM 2022. Australian Centre for Geomechanics – Perth. – P. 475–484. – DOI 10.36487/ACG\_repo/2135\_30.

## Об авторах

*Андрей Аркадьевич Шоломицкий* – доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

*Георгий Афанасьевич Уставич* – доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Виталий Андреевич Шаворин – аспирант кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, старший геомеханик АО «Полюс Красноярск».

*Екатерина Васильевна Ситникова* – старший преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии.

Получено 07.06.2024

© А. А. Шоломицкий, Г. А. Уставич, В. А. Шаворин, Е. В. Ситникова, 2025

# Analysis of ground-based interferometric radar scanning data at open-pit mining sites to identify false signals

A. A. Sholomitskii<sup>1</sup>, G. A. Ustavich<sup>1</sup>, V. A. Shavorin<sup>1 $\bowtie$ </sup>, E. V. Sitnikova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation <sup>2</sup> Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

### e-mail: shavorinva@yandex.ru

**Abstract.** Ground interferometric scanning as a method of monitoring quarry sides and benches during open-pit mining is a relatively new technology for our country. The implementation and operation of this technology at the facilities of domestic companies, as well as the subsequent interpretation of the obtained data, are associated with a number of difficulties. One of the key problems is the noise of scanning interferograms, which leads to false alarms of radars. As part of this study, an analysis was made of the influence of seasonal changes in meteorological conditions on the results of interferometric scanning data processing. The main methods for analyzing and minimizing the influence of meteorological factors on the accuracy of scanning are presented. A technique for processing interferometric scanning data is proposed, aimed at identifying and rejecting false alarms. The developed scheme allows increasing the efficiency of detecting false alarms, which helps to improve the safety of mining operations and reduce non-production downtime during open-pit mining.

**Keywords:** ground interferometric scanning, ground penetrating radar, quarry, geotechnical monitoring, landslide, deformations, displacement

## REFERENCES

1. Dick, G. J. (2013). Development of an early warning time-of-failure analysis methodology for open pit mine slopes utilizing the spatial distribution of ground-based radar monitoring data. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of applied science. *The University of British Columbia (Vancouver)*. 436 p. DOI:10.1139/cgj-2014-0028.

2. Ismagilov, R. I., Zakharov, A. G., Badtiev, B. P., Senin, N. V., Pavlovich, A. A., & Sviridenko, A. S. (2020). Use (testing experience) of ground penetrating radar at the construction site of a steeply inclined conveyor complex at the southern quarry of the Mikhailovsky GOK named after. A. V. Varicheva. *Gornaya promyshlennost'* [*Mining industry*], 3, 84–90. DOI 10.30686/1609-9192-2020-3-84-90. EDN GDBNKL. [in Russian].

3. Rozanov, I. Yu., & Kovalev, D. A. (2022). Analysis of the measurement results of the radar system for monitoring the stability of the side of the Zhelezny quarry of JSC Kovdor Mining and Processing Plant. *Cifrovye tekhnologii v gornom dele* [*Digital technologies in mining*]. Appatity, No.12-1, p. 122–133, DOI 10.25018/0236\_1493\_2022\_121\_0\_122 [in Russian].

4. Makarov, A. B., Ananin, A. I., & Spirin, V. I. (2018). Radar monitoring of the stability of quarry sides. *Sbornik nauchnyh trudov VNIICVETMETA* [*Collection of scientific works of VNIITSVETMETA*], 15–28. [in Russian].

5. Shavorin, V.A. (2023). On the issue of the relevance of import substitution in the field of civil terrestrial interferometric scanning. *Interekspo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia]*. Vol. 1, 154–161. DOI 10.33764/2618-981X-2023-1-1-154-161, EDN SUKGOZ [in Russian].

6. Burtsev, S. V., & Rybak, L. V. (2018). Radar systems for monitoring side stability at the Chernigovets open-pit mine. *Izvestiya TulGU. Nauki o zemle.* [*News of Tula State University. Geosciences*]. I. 1. P. 203–209. EDN YTFXBX.[in Russian].

7. Kanaev, E. D., & Bragin, A. A. (2023). Results of field tests of a geotechnical radar in Siberian conditions. *Elektronnyj zhurnal «Globus.Geologiya i biznes»* [*Electronic journal "Globus.Geology and Business"*]. Retrieved from https://www.vnedra.ru/tehnika/ oborudovanie/rezultaty-naturnyh-ispytanij-geotehnicheskogo-radara-v-usloviyah-sibiri-23015/. [in Russian].

8. Federal Information Foundation for Ensuring the Uniformity of Measurements. Retrieved from https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/17/items/237925. [in Russian].

9. Shavorin, V. A., & Gorilko, A. S. (2020) Study of the accuracy of side shift measurement systems using the example of the Groundprobe SSR-XT 3D radar. *Interekspo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia]. Vol. 1, No. 1. pp. 144–151. DOI 10.33764/2618-981X-2020-1-1-144-151. EDN: EBKNAJ.[in Russian].

10. Cabrejo, A., Bellet, P., Stickley, G., Silva R., Gunaris, Y., & Perez, J. (2020). Risk management and alarming based on a new atmospheric correction algorithm ground-based radars. *Slope Stability 2020. Australian Centre for Geomechanics. Perth*, 319–338. DOI 10.36487/ACG\_repo/2025\_17.

11. Shellam, R., Coggan, J. (2020). Analysis of velocity and acceleration trends using slope stability radar to identify failure signatures to better inform deformation trigger action response plans. *Slope Stability 2020. Australian Centre for Geomechanics. Perth*, 227–240. DOI:10.36487/ACG repo/2025 10.

12. Macqeen, G. K., Salas, E. L., & Hutchison, B. J. (2013). Application of radar monitoring at Savage River Mine, Tasmania. *Slope Stability*, P. 1011-1020.

13. Bellet, P., Noon, D., Leva, D., & Rivolta, C. (2015). 3D and 2D radars for open-pit slope monitoring. *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy Slope Stability*. P. 1–14.

14. Niekrasz, J., Banda, S., & Rinne, M. (2018). Review of radar system performance and estimation of slope deformation threshold values for the Leveaniemi open pit. *School of Engineering*. *Master's thesis*. P. 90.

15. Caduff, R., Schlunegger, F., Kos, F., & Wiesmann, A. (2014). A review of terrestrial radar interferometry for measuring surface change in the geosciences. Earth surface processed and landforms. P. 208 – 228. DOI 10.1002/esp.3656.

16. Powell, CL., Brockhurst, N. (2022). Case study: rockfall assessment and mitigation at the Newmont Boddington Gold mine. *SSIM 2022. Australian Centre for Geomechanics. Perth.* P.475-484. DOI 10.36487/ACG\_repo/2135\_30.

#### About authors

*Andrei A. Sholomitskii* – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

*Georgij A. Ustavich* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

*Vitaly A. Shavorin* – Ph. D. Student, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying. Senior geomechanical engineer «Polyus Krasnoyarsk».

Ekaterina V. Sitnikova – Senior Lecturer at the Department of Mine Surveying and Geodesy

Received 07.06.2024

© A. A. Sholomitskii, G. A. Ustavich, V. A. Shavorin, E. V. Sitnikova, 2025