

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

На правах рукописи

Шаворин Виталий Андреевич



Совершенствование методики геодезического мониторинга
в горнорудной промышленности с использованием наземных
интерферометрических радаров

1.6.22. Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Шоломицкий Андрей Аркадьевич

Новосибирск – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА СДВИЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ	11
1.1 Анализ актуального состояния методов мониторинга на открытых горных работах	11
1.2 Системы инструментального долговременного наблюдения	24
1.2.1 Роботизированные системы мониторинга деформационных процессов	25
1.2.2 ГННС-технологии для мониторинга деформационных процессов	32
1.3 Применение спутниковой и наземной радарной интерферометрии при мониторинге карьеров, отвалов и дамб при разработке месторождений	35
1.4 Обзор существующих наземных интерферометрических систем сканирования	42
1.5 Основные отличия радаров с реальной и синтезированной апертурными решетками. Плюсы и минусы	50
1.6 Преимущества радарного мониторинга над другими инструментальными методами в условиях низких температур	55
1.7 Распространенность технологии наземного интерферометрического сканирования на объектах отечественных компаний	59
1.8 Системы улавливания камнепадов и обвалов	61
1.9 Выводы по первому разделу	66
2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО НАЗЕМНОГО СКАНИРОВАНИЯ	71
2.1 Создание эффективной системы мониторинга для объектов открытых горных работ	71

2.1 Обоснование достаточной частоты наблюдений различных методов мониторинга.....	74
2.2 Внедрение технологии наземного интерферометрического сканирования в традиционную систему мониторинга на открытых горных работах	82
2.3 Выводы по второму разделу	94
3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ СКАНИРОВАНИЯ НАЗЕМНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ РАДАРОВ ПРИ МОНИТОРИНГЕ НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ	95
3.1 Определение неоднозначностей и ложных срабатываний при интерпретации интерферограмм сканирования.....	95
3.2 Методика расчета объемов вскрышных работ по данным сканирования наземных интерферометрических радаров.....	114
3.3 Сравнение данных сканирования радаров с результатами геодезических методов наблюдений.....	121
3.4 Выводы по третьему разделу	133
4 РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДИК ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ НА ОБЪЕКТАХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ КОМПАНИЙ	135
4.1 Геотехнические риски при ложных срабатываниях радара	135
4.2 Определение пороговых значений скорости и смещений для радаров на объектах горных работ, ведущих разработку открытым способом в условиях низких температур.....	137
4.3 Разработка матрицы реагирования при радарном мониторинге.....	142
4.4 Выводы по четвертому разделу	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	151
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) АКТ О ВНЕДРЕНИИ.....	169

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Увеличение глубины и крутизны бортов карьеров, на которых ведется разработка полезных ископаемых открытым способом, способствует повышению вероятности их обрушений, что ведет к снижению безопасности и эффективности освоения месторождений.

Усложнение условий добычи полезных ископаемых открытым способом приводит к необходимости поиска новых решений по оптимизации затрат.

Одним из эффективных подходов является сокращение объемов вскрышных работ за счет формирования более крутых бортов карьеров либо разработка месторождения в режиме контролируемых или допустимых деформаций и рисков. Этот подход, с одной стороны, способствует увеличению экономической эффективности за счет получения дополнительной прибыли, а с другой стороны, связан с повышенным риском возникновения неустойчивости бортов и откосов.

В рамках настоящего исследования проведен анализ организации эффективной системы мониторинга, включающей комплексное использование геодезических методов наблюдений, включая радарную интерферометрию, которая рассматривается как критически важный элемент для обеспечения безопасности и безаварийного выполнения работ в условиях глубоких и сверхглубоких карьеров при активном ведении горных работ.

Проведенный анализ обрушений показывает, что деформации часто выявляются либо на основании визуальных наблюдений бортов карьеров с целью обнаружения трещин, просадок и выпоров, либо уже по результатам их последствий, например по наблюдениям скопления разрушенной горной массы на бермах, повреждения горного оборудования или ответственных сооружений и др.

В ряде случаев, несмотря на наличие действующей системы геодезического мониторинга, даже с помощью инструментальных наблюдений не удаётся своевременно обнаружить начало процесса деформирования откосов и оперативно принять необходимые меры для повышения уровня безопасности.

В рамках анализа и управления рисками при эксплуатации карьеров особое внимание уделяется обеспечению устойчивости их бортов и уступов. Для достижения этой цели необходимо провести комплексную переоценку проектных решений, включающую разработку и своевременную реализацию противодеформационных мероприятий, а также корректировку параметров откосов по результатам непрерывного геодезического мониторинга состояния бортов разрабатываемых карьеров и других потенциально опасных зон [69, 46, 5, 6, 93]. Только подобный комплексный подход, включающий систематический контроль и анализ данных наблюдений, позволит эффективно управлять рисками и обеспечить долгосрочную устойчивость карьерных выработок [40].

В связи с этим возникает необходимость разработки комплексного подхода к анализу и интерпретации данных наблюдений, полученных с помощью интерферометрических радаров, а также корректного интегрирования интерферометрического сканирования в существующую систему геодезического мониторинга. Сбор статистических данных о произошедших обрушениях и выявление причин возникновения нестабильных зон имеют важное значение для анализа и последующего прогнозирования деформаций и механизмов их развития в будущем.

Поэтому совершенствование методики комплексного геодезического мониторинга в горнорудной промышленности с внедрением в нее наземных интерферометрических радаров является важной и актуальной задачей.

Степень разработанности темы. В настоящее время геодезический мониторинг с применением интерферометрических радаров представляет собой наиболее прогрессивный метод оценки устойчивости откосов. Отметим, что в практике горнодобывающей отрасли зарубежных компаний на протяжении длительного времени данный метод достаточно успешно применяется в сочетании с традиционными методами геодезического мониторинга.

Однако внедрение технологии интерферометрического наземного сканирования в российское производство происходит с некоторыми задержками и сталкивается с определенными трудностями. Основными причинами, препятствующими широкому

распространению данного метода, являются: отсутствие детальных инструкций и нормативной базы по эксплуатации используемого оборудования; технические сложности при интеграции наблюдений интерферометрических радаров в существующую систему геодезического мониторинга; отсутствие разработанных методик интерпретации результатов измерений и рекомендаций по выбору критериев безопасности.

Большой вклад в развитие геодезического и геомеханического мониторинга при изучении деформационных процессов в России и за рубежом внесли такие ученые, как Авершин С. Г., Балек А. Е., Бартон Н., Бахурин И. М., Брайт П. И., Влох Н. П., Гальперин А. М., Гуляев Ю. П., Жиров Д. В., Зотеев О. В., Зубков А. В., Ильинов М. Д., Иофис М. А., Каплунов Д. Р., Карлсон А. А., Кашников Ю. А., Козырев А. А., Кузьмин Ю. О., Кутепов Ю. И., Мазуров Б. Т., Макаров А. Б., Малиникова О. Н., Низаметдинов Ф. К., Ожигин Д. С., Опарин В. Н., Панжин А. А., Панкрушин В. К., Радченко А. В., Рассказов И. Ю., Розанов И. Ю., Рыбин В. В., Рыльникова М. В., Сашурин А. Д., Соловицкий А. Н., Трофимов В. А., Фисенко Г. Л., Шоломицкий А. А., Шпакова П. С., Юнакова Ю. Л. и др.

За рубежом также известен ряд современных ученых, занимающихся разработкой методик мониторинга деформационных процессов. К ним можно отнести таких исследователей, как Bar N., Bill D., Macqueen G. K., Marisette S., Salas E. L., Stacey P., Hoek E. и др.

В последние десятилетия значительный вклад в развитие технологий интерферометрического сканирования в горнодобывающей отрасли внесли такие зарубежные исследователи, как Dick G. J., Coggan J., Coetsee S., Sounders P., Shellam R. Их работы способствовали существенному прогрессу в области разработки новых методов неразрушающего контроля при мониторинге состояния горных массивов, что позволило повысить безопасность и эффективность горных работ.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является совершенствование методов геодезического мониторинга на открытых горных работах посредством внедрения технологии наземного интерферометрического сканирования в качестве базового инструмента в существующую систему геодезического мониторинга и повышения эффективности его применения.

Основные задачи исследований:

1 Выполнить анализ научно-технических разработок в области современных методов геодезического мониторинга на открытых горных работах в российской и зарубежной практике, а также определить наиболее перспективные направления совершенствования методов при проведении открытых горных работ с использованием наземных интерферометрических радаров.

2 Исследовать применяемую на карьерах российских компаний традиционную систему геодезического мониторинга и провести ее усовершенствование, повысив эффективность путем внедрения интерферометрического сканирования как базового инструмента при наблюдениях за смещениями горного массива.

3 Выполнить анализ эффективности применения наземного интерферометрического сканирования на объектах открытых горных работ.

4 Разработать матрицу реагирования в процессе радарного мониторинга по данным анализа произошедших деформаций.

5 Провести апробацию результатов работы на крупном горнодобывающем предприятии, с получением акта внедрения.

Объект и предмет исследования. Объектом научного исследования являются методы и средства радарной интерферометрии, используемые для дистанционного геодезического мониторинга состояния опасных деформационных процессов и явлений, способствующих возникновению кризисных ситуаций на карьерах в северных регионах РФ.

Предметом исследования является совершенствование системы мониторинга в горнорудной промышленности с применением наземных интерферометрических радаров.

Научная новизна диссертационных исследований заключается в следующем:

– обосновано повышение эффективности системы геодезического мониторинга при внедрении интерферометрических радаров как базового инструмента наблюдений за смещениями горного массива;

- разработана схема интеграции интерферометрического сканирования в существующую систему геодезического мониторинга, что является совершенствованием методики геодезического мониторинга на горнорудных предприятиях;
- разработана алгоритмическая схема обработки данных интерферометрического сканирования, позволяющая распознавать и классифицировать ложные срабатывания системы мониторинга, повышая эффективность производства горных работ путем снижения простоев оборудования;
- разработана матрица реагирования в структуре мониторинга с использованием интерферометрических радаров, которая позволяет оценить опасность происходящих деформационных процессов и риски для горного предприятия.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии и совершенствовании методики геодезического мониторинга состояния бортов разрабатываемых карьеров. В рамках исследования предлагается интеграция наземного интерферометрического сканирования в систему наблюдений за деформациями и обосновывается его эффективность, что позволит повысить точность и достоверность получаемых данных.

Практическая значимость работы заключается в том, что внедрение технологии наземного интерферометрического сканирования и ее интеграция в существующую систему геодезического мониторинга позволят повысить надежность определения геометрических параметров сдвижения бортов и уступов карьеров и эффективность системы в целом.

Методология и методы исследования. Методологической базой исследования являются: методы математической обработки пространственных данных и трехмерного компьютерного моделирования. Статистический анализ данных интерферометрического сканирования осуществлялся с использованием программного обеспечения IBM SPSS Statistics. Разработанные алгоритмы базируются на теоретических, аналитических и экспериментальных исследованиях и были успешно апробированы на производстве.

Положения, выносимые на защиту:

1 Усовершенствована методика геодезического мониторинга бортов карьеров, основанная на внедрении наземных интерферометрических радаров как базового инструмента, позволяющая эффективно и своевременно производить измерения смещения горного массива, обеспечивая безопасную эксплуатацию горного предприятия (пункты 2 и 10 паспорта специальности).

2 Предложена алгоритмическая схема определения ложных срабатываний при мониторинге с использованием наземных интерферометрических радаров, позволяющая повысить эффективность горных работ путем снижения простоев оборудования (пункт 10 паспорта специальности).

3 Разработанная на основе выявленных корреляционных связей между объемами деформируемой горной породы, ее смещениями и скоростями сдвижения матрица реагирования при интерферометрическом радарном мониторинге деформаций позволяет классифицировать риски потери устойчивости и определять реакцию на ожидаемые процессы сдвижения (пункт 10 паспорта специальности).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует областям исследования: 2 – Методы и средства космической геодезии, включая радиоинтерферометрию со сверхдлинными базами, радарную интерферометрию, доплеровские дальномерные системы, спутниковую альтиметрию, спутниковую градиентометрию, лазерную локацию спутников, запросные и беззапросные дальномерные и другие системы. Методы и средства геодезической астрономии; 10 – Дистанционный геодезический мониторинг состояния окружающей среды, в первую очередь, опасных процессов и явлений, способствующих возникновению стихийных бедствий и кризисных ситуаций, в том числе путем создания сетей непрерывных и повторных наземных, морских, спутниковых наблюдений паспорта научной специальности 1.6.22. Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Основные положения диссертации обсуждались и были одобрены на Международных научных конгрессах: «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (2020–2025 гг.), СГУГиТ, г. Новосибирск; «Актуальные проблемы геодезии, картографии, кадастра, геоинформационных технологий, рационального земле- и природопользования», Белоруссия, Новополоцк, 2022 г.; 26-м Всероссийском специализированном семинаре по проектированию и разработке месторождений ТПИ, Россия, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского».

Разработанные способы мониторинга с помощью интерферометрических радаров базируются на теоретических исследованиях и накопленном производственном опыте ведущих российских и зарубежных научных организациях. Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается экспериментальными расчетами. Практическое применение разработок апробировано и внедрено на промышленных объектах Олимпиадинского ГОКа компании АО «Полюс Красноярск» (Приложение А).

Публикации по теме диссертации. Основные результаты исследований представлены в 8 научных работах, 3 из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 1 – в журнале, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составил 169 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, включающего 114 наименований, содержит 24 таблицы, 70 рисунков и 1 приложение.

1 СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА СДВИЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

1.1 Анализ актуального состояния методов мониторинга на открытых горных работах

В результате эволюции горнодобывающей отрасли как за рубежом, так и в России, а также перехода к разработке глубокозалегающих рудных тел, глубина отработки месторождений открытым способом достигла значений, превышающих 1 000 м от уровня земной поверхности [16]. В таблице 1 представлены данные о наиболее глубоких карьерах мира, включая их проектную и фактическую глубину [19, 48].

При разработке месторождений на таких значительных глубинах возникает фундаментальная проблема, связанная с возрастающим напряжением в массиве горных пород. Это напряжение может привести к неустойчивости бортов и уступов эксплуатируемых карьеров, что требует применения специализированных методов и технологий для обеспечения их безопасного функционирования [47, 12, 22].

Таблица 1 – Сводная таблица сведений о глубоких карьерах мира

Название	Страна	Добыча	Проектная глубина (м)	Глубина по состоянию на 2022 г. (м)
Серро-Верде (Cerro Verde Superpit)	Перу	Молибден, медь	1 400	700
Лос-Пеламбрес (Los Pelambress)	Чили	Медь	1 250	700
Эскондида (Escondida)	Чили	Медь	1 200	650
Бингем Каньон (Kennecott Bingham Canyon Mine)	США	Молибден, медь, золото	1 200	1 030

Название	Страна	Добыча	Проектная глубина (м)	Глубина по состоянию на 2022 г. (м)
Чукикамата (Chuquicamata)	Чили	Серебро, медь, золото	1 190	1 190
Ок-Теди (Ok Tedi)	Папуа-Новая Гвинея	Медь, золото	1 000	900
Мурунтау	Узбекистан	Золото	1 000	600
Бату Хиджау (Batu Hijau)	Индонезия	Золото, медь	1 000	870
Восточный (Полюс)	Россия	Золото	960	750
Джваненг (Jwaneng Cut 9)	Ботсвана	Алмазы	900	650
Грасберг (Grasberg)	Индонезия	Золото	850	850
Айтик (Aitik)	Швеция	Медь	850	430
Палабора (Palabora)	ЮАР	Медь	820	820
Голдстрайк (Goldstrike)	США	Золото	800	550
Фимистон (Fimiston)	Австралия	Золото	760	620

Нарушения устойчивости бортов и откосов приводят к увеличению объёмов вскрыши, дополнительным затратам на переэкскавацию, нарушению режима работы карьеров, простоям и авариям горнотранспортного оборудования, а также к значительному материальному ущербу для эксплуатирующей компании.

Согласно результатам исследования Гальперина А. М., выдающегося советского и российского учёного-горняка, две трети эксплуатируемых карьеров подвержены развитию деформационных процессов [7]. Наблюдается тенденция увеличения случаев потери устойчивости откосов с увеличением глубины отработки, что логично, поскольку напряжение в горном массиве возрастает пропорционально глубине.

При проведении горных работ на глубинах до 100 м, деформации наблюдаются в половине исследуемых карьеров. С увеличением глубины до значительных

значений, доля карьеров, подверженных деформационным процессам, возрастает до 80 %.

Анализ, проведенный в ВИОГЕМ [7], выявил, что 75 % деформаций происходят в песчано-глинистых отложениях, тогда как 25 % приходится на откосы, состоящие из скальных и полускальных трещиноватых пород. Деформации скальных пород представляют особую опасность из-за их быстрого развития и сложности прогнозирования на основе данных мониторинга. Именно деформации скальных пород являются объектом данного научного исследования.

Любые деформации горного массива, которые могут представлять опасность для человека или оборудования, классифицируются как геотехнические источники риска. На рисунке 1 представлены основные типы деформаций (нарушений) скальных пород. Эти деформации подразделяются на следующие категории: плоский сдвиг, клиновидный вывал, опрокидывание блоков, вращательный сдвиг (по криволинейной поверхности), камнепад [95, 114].

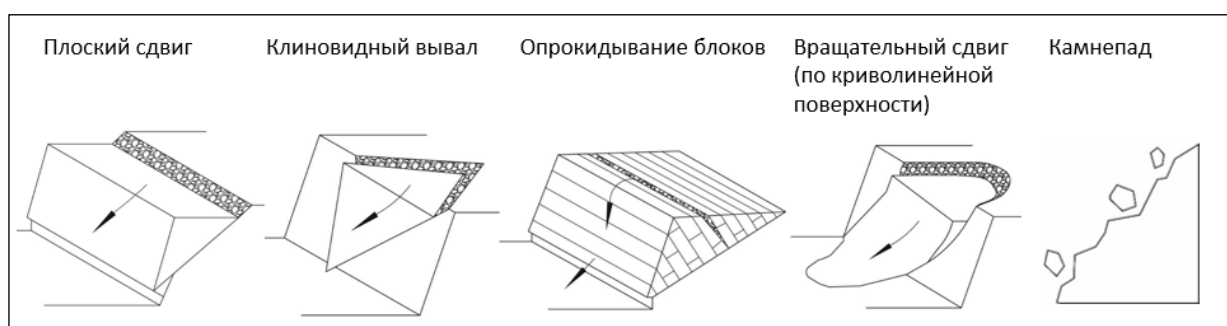


Рисунок 1 – Основные типы деформаций скальных пород

Помимо подразделения деформаций на типы, выделяются основные масштабные уровни рисков разрушения откосов (рисунок 2):

1 Разрушение в пределах одного уступа – структурные обрушения по естественным трещинам, как системным, так и внесистемным.

2 Разрушение группы уступов – структурные обрушения по разломам и естественным трещинам.

3 Разрушение всего борта карьера – оползни в слабом массиве, выветрелом или сильнотрещиноватом. Часто наблюдается обрушение по криволинейной поверхности [90].

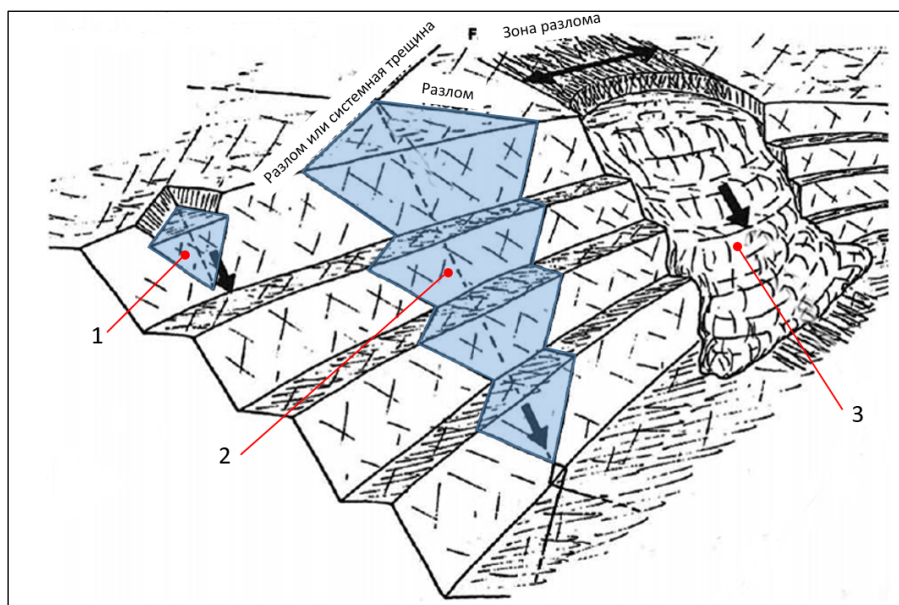


Рисунок 2 – Масштабные уровни деформаций в скальных массивах

Систематические наблюдения за состоянием бортов и уступов карьера представляют собой неотъемлемый элемент геодезического мониторинга. В процессе эксплуатации объектов ведения открытых горных работ для своевременного выявления опасных зон и прогнозирования развития деформаций необходимо осуществлять комплекс геодезических, геотехнических, гидрогеологических и иных наблюдений, достаточных для обеспечения безопасности работ, включающий визуальные и инструментальные наблюдения за устойчивостью бортов, уступов, откосов [55].

Своевременная разработка мероприятий по управлению прибортовыми массивами в значительной степени определяется достоверностью знаний о причинах и условиях, провоцирующих возникновение деформаций. Прогнозирование и обеспечение устойчивости карьерных откосов представляет собой одну из важнейших задач при ведении открытых горных работ [45]. Снижение устойчивости бортов можно минимизировать посредством изменения параметров разработки карьера,

таких как уменьшение генерального угла наклона борта карьера или высоты уступов. Однако подобный подход зачастую оказывается экономически невыгодным для эксплуатирующей организации [60].

К сожалению, в настоящее время, несмотря на тщательное соблюдение проектных нормативов при проведении горных работ и внедрение передовых методов геотехнического мониторинга на карьерах, а также использование современных технологий прогнозирования и оборудования для контроля устойчивости бортов карьеров, имеют место случаи внезапных и неконтролируемых обрушений откосов.

Именно поэтому, для минимизации подобных ситуаций, и для работы в режиме управляемых деформаций, в настоящее время на открытых разработках одной из важнейших задач является инструментальный контроль за состоянием приобортового массива с полным его покрытием. Это связано со значительным объемом ведения горных работ открытым способом, при котором происходят различного рода локальные деформации откосов уступов и бортов. Основные требования по мониторингу и наблюдениям за состоянием откосов на карьерах отражены в Федеральных нормах и правилах в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов», утвержденных приказом № 439 от 13 ноября 2020 г. [55].

В данном документе подробно представлены виды наблюдений, которые необходимо проводить при разработке полезных ископаемых открытым способом. К ним относятся:

- систематическое визуальное обследование откосов;
- упрощенные кратковременные маркшейдерские наблюдения при деформации откосов на отдельных участках;
- высокоточные инструментальные наблюдения по профильным линиям;
- съемки с целью паспортизации уже проявившихся оползней и обрушений уступов и систематический маркшейдерский контроль за соблюдением проектных откосов уступов.

В соответствии с пунктом 57 вышеуказанных нормативных актов, на объектах ведения горных работ II класса опасности и при комбинированной разработке месторождений, необходимо создание специальной выделенной группы по мониторингу и прогнозу устойчивости бортов, уступов, откосов (геомеханической службы). Ко II классу опасности относятся карьеры с годовым объёмом разработки горной массы 1 млн м³ и более [41].

Состав группы, а также должностные обязанности утверждаются техническим руководителем предприятия, осуществляющей разработку месторождения.

В перечень основных функций группы входит:

- оценка текущего состояния бортов карьера;
- сбор данных о породах (включая керн и поверхности откосов);
- изучение физико-механических свойств и трещиноватости горного массива;
- ведение базы данных по объекту;
- расчёты устойчивости бортов, уступов и отвалов;
- определение причин деформаций, прогноз их развития;
- оценка связанных с деформациями рисков и рекомендации по их снижению.

Структурно группа разделена на аналитическую часть и подразделение, отвечающее за мониторинг.

Пример структуры геомеханической группы (отдела) с минимальным численным штатом представлен на рисунке 3.

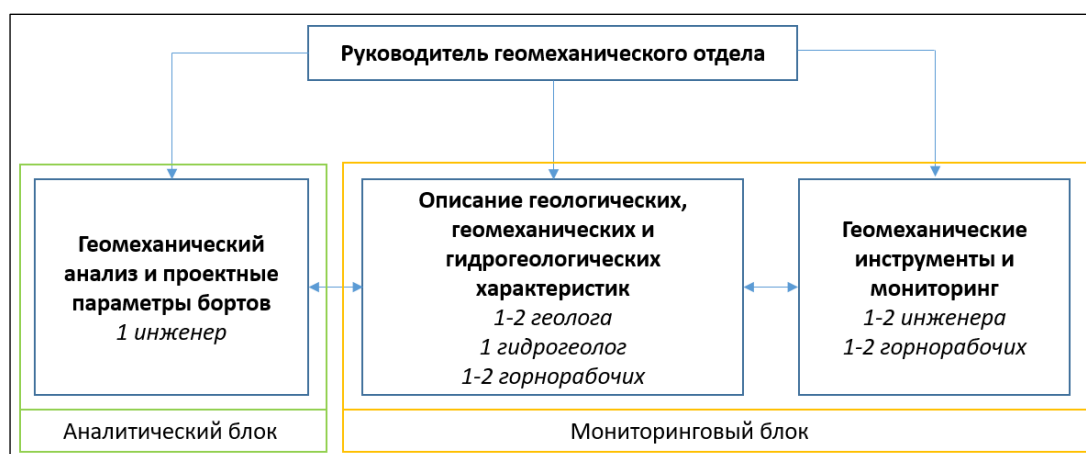


Рисунок 3 – Пример структуры геомеханического отдела

В рамках крупных производственных компаний, как российских, так и зарубежных, осуществляющих эксплуатацию нескольких месторождений, создаются целые специализированные мониторинговые центры, в которых консолидируется, анализируется и хранится информация с датчиков оперативного мониторинга (рисунки 4, 5).



Рисунок 4 – Пример организации мониторингового центра на одном из российских карьеров



Рисунок 5 – Пример организации мониторингового центра в Бразилии

Организация работ в рамках деформационного мониторинга регламентируется рядом нормативных документов:

- Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» [55];
- «Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости» [34];
- Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов, уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости [17];
- Приказ Ростехнадзора «Об утверждении правил осуществления маркшейдерской деятельности» [56].

Мониторинг деформаций при открытой разработке полезных ископаемых – это система мер, позволяющая решать ключевые геомеханические задачи:

- определение типа деформаций массива горных пород, скорости их развития и установление их границ;
- определение критических значений смещений, после которых начинается активная фаза;
- установление причин развития деформаций, прогноз степени опасности и расчет рисков их дальнейшего развития;
- контроль за ведением горных работ в пределах деформаций;
- оценка результативности принятых противодеформационных мер.

Таким образом, можно сделать вывод, что деформационный мониторинг представляет собой критически важный инструмент для обеспечения безопасности в горнодобывающей промышленности и жизнедеятельности населения в потенциально опасных зонах. Он способствует снижению экономических затрат, связанных с ликвидацией последствий разрушающих деформаций.

На основе данных, полученных в результате деформационного мониторинга, осуществляется своевременное оповещение персонала горного предприятия и со-

ответствующих служб. Это позволяет минимизировать ущерб, причиняемый деформациями, а также оперативно и долгосрочно принимать меры по борьбе с ними и устранению последствий их проявления.

Последствия могут выражаться как качественными характеристиками (угроза жизни или здоровью персонала, описание последствий), так и количественными (затраты на ликвидацию последствий деформации). Качественная оценка последствий выполняется на основании положений таблицы 2 [36]. Количественная оценка определяется исходя из решения эксплуатирующей организации в ее необходимости.

Таблица 2 – Оценка тяжести последствий обрушения бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов

Незначительные	Низкие	Средние	Высокие	Чрезвычайные
Обрушение на отдельном участке вне зоны ведения горных работ, не влияющее на технологический процесс	<ul style="list-style-type: none"> – ликвидация обрушения требует несколько дней или не влияет на технологический процесс; – обрушение откосов с коротким периодом эксплуатации; – обрушения не оказывают влияние на внутрикарьерную инфраструктуру; – повреждения оборудования отсутствуют 	<ul style="list-style-type: none"> – краткосрочная ликвидация обрушения (*); – простои основного технологического оборудования; – повреждение оборудования и инфраструктуры, требующее ремонта; – восстановление съезда или ремонт путей откатки 	<ul style="list-style-type: none"> – потеря подготовленных к выемке запасов; – среднесрочная ликвидация последствий обрушения (*); – повреждение и длительные простои основного технологического оборудования и/или инфраструктуры, требующие капитального ремонта; – потеря основного технологического оборудования и/или инфраструктуры; – потеря транспортного съезда (при наличии резервного) 	<ul style="list-style-type: none"> – угроза жизни и здоровью людей; – потеря транспортного съезда (при отсутствии резервного); – нарушение технологического цикла, требующее реконструкции

* – срочность ликвидации определяется экспертно.

Маркшейдерские работы, включая инструментальные маркшейдерские наблюдения, осуществляются маркшейдерской службой эксплуатирующей организации. В процессе мониторинга деформаций необходимо определять следующие параметры:

- наличие (отсутствие) деформаций, характер и стадии их развития;
- границы распространения и виды нарушений устойчивости отдельных уступов, групп уступов, бортов карьера, разреза, откосов отвала;
- основные факторы, предопределяющие развитие нарушений устойчивости;
- смещения контролируемых знаков (реперов, точек), скорости деформаций, направление и развитие процессов сдвижения и деформации во времени;
- относительные деформации сжатия-растяжения, наклоны;
- соответствие проектных и фактических параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов и их допустимых значений критериям безопасности;
- изменение геометрии борта карьера, разреза от воздействия процессов выветривания и деформаций [55].

Методы мониторинга бортов и уступов карьера можно классифицировать на две основные группы – методы поверхностного и подземного мониторинга контурного массива, которые, в свою очередь, подразделяются на методы качественного и количественного мониторинга. Все они находят применение при определенных условиях разработки карьера и часто зависят от размера возможного обрушения.

Системы качественного мониторинга могут предусматривать визуальное наблюдение, которое, при всей своей субъективности, может оказать неоценимую помощь. Это могут быть общие осмотры с целью выявления начальных проявлений неустойчивости (например, трещины растяжения, чрезмерный камнепад) или мероприятия в рамках обеспечения безопасности (страховки от камнепада). Данные осмотров должны документироваться в журналах осмотров и передаваться следующей смене.

Системы количественного мониторинга, как правило, включают приборы и инструменты для измерения поверхностных и глубинных смещений. В настоящее

время применяются типовые компоненты систем для регистрации смещений поверхностей откосов, которые можно расположить в порядке возрастающей сложности следующим образом:

- 1 Визуальные наблюдения.
- 2 Периодические инструментальные наблюдения:
 - электронно-оптические приборы;
 - GPS/ГЛОНАСС-приемники геодезического класса;
 - лазерные сканеры;
 - сейсмостанции;
 - прочие измерительные инструменты (рулетки, рейки и т. д.).
- 3 Автоматизированные наблюдения;
 - стационарные GPS/ГЛОНАСС-станции;
 - роботизированные тахеометры (призмный мониторинг);
 - лазерные сканеры для оперативного мониторинга;
 - радары устойчивости откосов (наземные GB-SAR и спутниковые InSAR);
 - разнообразные датчики деформаций (на основе инклинометров, акселерометров, экстензометров и др.).

Эффективная система мониторинга бортов на больших и глубоких карьерах обычно включает комбинацию этих компонентов, один из которых обеспечивает первичный мониторинг, лежащий в основе управления устойчивостью.

Однако даже при наличии множества современных инструментальных технологий, их все равно следует рассматривать как инструменты, помогающие специалистам по мониторингу понять поведение деформации. Приборы и оборудование, для мониторинга состояния бортов и уступов, независимо от степени совершенства технологии, не могут заменить визуальные осмотры в месте деформации, проводимые опытными и обученными специалистами [111].

Визуальный контроль бортов и уступов карьера проводится путем регулярных осмотров как специалистом, отвечающим за мониторинг или маркшейдером отдельно, так и в составе комиссии с фотофиксацией и занесением результатов

осмотра в специальный журнал осмотра состояния бортов, уступов, откосов, и подписывается лицами, которые произвели осмотр. О результатах наблюдений в обязательном порядке информируется технический руководитель эксплуатирующей организации [55]. Визуальные наблюдения являются неотъемлемой частью любой программы мониторинга и могут быть классифицированы на несколько типов [98]:

- 1 Ежедневные и еженедельные визуальные осмотры.
- 2 Ежемесячные осмотры с включением в месячный отчет по состоянию бортов и уступов карьера.
- 3 Детальные осмотры, проводимые инженерами-геомеханиками или геологами после выявления деформаций.
- 4 Осмотр всех бортов, после проведения взрывных и оборочных работ с составлением акта состояния бортов.

В рамках данного исследования сосредоточимся на рассмотрении наиболее очевидных и длительное время апробированных систем количественного мониторинга, таких как роботизированные системы, ГНСС-технологии и наземное интерферометрическое сканирование. Остальные системы, а именно: фотограмметрия, лазерное сканирование, или спутниковый интерферометрический радар (InSAR) имеют различные недостатки, такие как точность и оперативность измерений, а использование микросейсмических датчиков – ещё и неоднозначность при дешифровке [6, 40]. Применение оптических приборов, таких как нивелиры и теодолиты для мониторинга деформационных процессов в современных системах мониторинга, используют крайне редко, так как данная технология является достаточно устаревшей и малоэффективной [88].

В таблице 3 представлено применение различных методик и инструментов, используемых для обнаружения неустойчивости различных масштабов, и возможные последствия [61].

Таблица 3 – Сводная таблица методов мониторинга по масштабу возможных разрушений и последствий [61]

Размер блока, м ³	Скорость разрушения	Последствия	Метод обнаружения	Метод реагирования
1–10	Средняя	Обрушение - безопасность	Визуально	Перехват
10–1 000	Быстрая - стремительная	Безопасность	Визуально, Радиолокатор	Перехват
1 000–100 000	Медленная - быстрая	Эксплуатационные показатели	Визуально Маркшейдерская съемка Радиолокатор Сейсмический контроль	Контроль Модификация откоса (за контуром)
100 000–1 000 000	Медленная - средняя	Эксплуатационные и финансовые показатели	Маркшейдерская съемка Радиолокатор Рефлектометр/инклинометр Сейсмический контроль	Контроль Модификация откоса (за контуром) Перепланирование фронта ведения выемочных работ
>1 000 000	Медленная - средняя	Форс-мажор	Маркшейдерская съемка Радиолокатор Рефлектометр/инклинометр Сейсмический контроль	Модификация откоса (перепланировка выемки) Прекращение ведения горных работ (>10 млн м ³) Контроль

В таблице 3 значение скорости разрушения горного массива ранжируется в диапазоне от стремительной, происходящей за секунды и минуты, до медленной, способной длиться неделями и месяцами. Промежуточные значения скорости разрушения это быстрая – развитие за минуты и часы, и средняя – развитие за дни и недели.

Наиболее вероятные стратегии методов реагирования и способа мониторинга в таблице выделены жирным шрифтом, а курсивом обозначены дополнительные или альтернативные варианты.

Сравнительные результаты эффективности различных методов мониторинга устойчивости бортов карьеров представлены в таблице 4 [21].

Таблица 4 – Тип мониторинга по эффективности

Методы мониторинга	Эффективность
Визуальный контроль	32 %
Призменный мониторинг	45 %
Визуальный + призменный	63 %
Визуальный + призменный + лазерный мониторинг	86%
Радарный мониторинг	93 %
Визуальный + призменный + радарный мониторинг	97,5 %
Визуальный + призменный + лазерный + радарный мониторинг	99 %

Анализ данных, представленных в таблице 4, демонстрирует, что эффективность наземного интерферометрического сканирования как самостоятельного метода мониторинга является весьма значительной и составляет 93 %. При внедрении комплексной системы мониторинга бортов и уступов карьера, основанной на использовании радарного сканирования, теоретически можно достичь эффективности системы до 99 %.

1.2 Системы инструментального долговременного наблюдения

Выбор методов мониторинга деформационных процессов определяется их масштабом и скоростью протекания. Для кратковременных деформаций, происходящих в течение часов или дней, и охватывающих объемы до 1 000 м³, достаточно визуальных наблюдений, которые могут быть дополнительно усилены наземным радарным мониторингом. В случае более медленных деформаций, происходящих на протяжении дней, недель или месяцев и охватывающих объемы свыше 1 000 м³, необходимо использовать инструментальные методы наблюдений.

В данном разделе рассматриваются основные типы инструментов традиционного мониторинга и проводится анализ их эффективности на карьерах российских и зарубежных компаний.

1.2.1 Роботизированные системы мониторинга деформационных процессов

Роботизированные электронные тахеометры (рисунок 6) являются на сегодняшний день наиболее востребованными геодезическими инструментами для мониторинга бортов и уступов карьеров. Данную систему начали применять на карьерах с начала 1990-х гг., и сейчас она используется на многих карьерах мира в качестве базовой, ввиду традиционности в части восприятия, а также достигаемой высокой точности. Призменный мониторинг предполагает определение трехмерных векторов смещения отражателя электронным тахеометром. В результате данного мониторинга формируется полный вектор перемещения контрольной точки наблюдения, а также измеряются расстояния и превышения между реперами.



Рисунок 6 – Роботизированный электронный тахеометр Leica TM50, установленный в защитном укрытии на карьере

Наблюдения автоматизированной станции ведутся в следующей последовательности. Электронный тахеометр устанавливается в рабочее положение, в ручном режиме определяются исходные координаты опорных точек и деформационных марок (отражательных призм), установленных на бермах и откосах карьера. Полученные координаты вводятся в систему управления электронного тахеометра и задается программа последующих наблюдений. Все последующие наблюдения производятся в автоматическом режиме, количество угловых приемов и количество повторных измерений расстояний задается исходя из требуемой периодичности наблюдения деформации. Один прием подобных измерений при 30 призмах занимает от 15 до 20 минут. Данные измерений передаются на сервер и компьютер пользователя, архивируются и записываются. Автоматизированная система может функционировать в непрерывном или периодическом режиме в зависимости от задач обеспечения безопасности.

Для минимизации погрешностей используют методику наблюдений, предусматривающую соблюдение определенных условий, таких как закрепление отражателей на жестком основании; максимальное расположение рабочих реперов от опорных или связующих реперов не более 500 м; при наблюдениях на расстояниях более 500 м учитывается поправка за температуру и давление на момент проведения серии наблюдений; систематический контроль положения опорных и связующих реперов в каждой серии наблюдений [10].

Пример расположения отражательных призм при автоматизированном призмённом мониторинге представлен на рисунке 7.

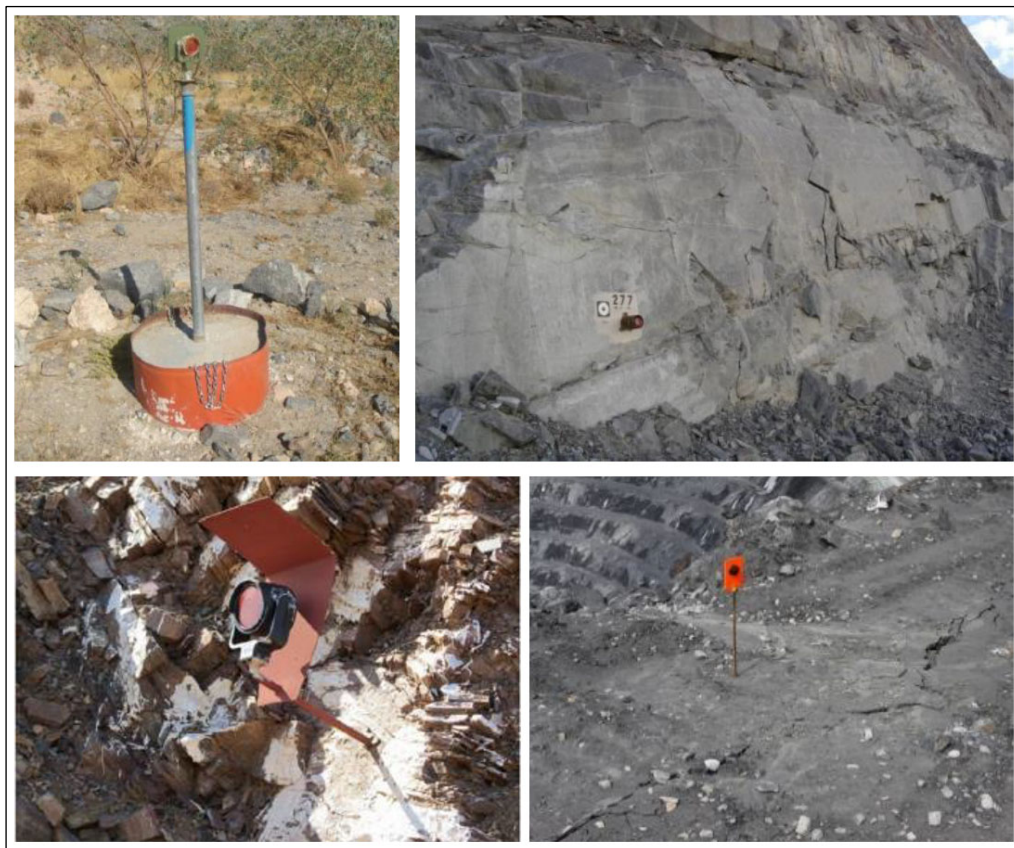


Рисунок 7 – Пример отражателей в карьере

Для обеспечения требуемой точности измерений необходимо регулярно проверять положение призм и наблюдательных станций, а при необходимости повторно привязывать их к координатной маркшейдерской сети горного предприятия с использованием ГНСС-приемника или, если это возможно, контрольных точек, находящихся вне зоны влияния карьера и отвалов.

Все измерения электронным тахеометром выполняются при двух положениях вертикального круга для повышения точности и исключения грубых ошибок. Прием измерения включает одно наведение на отражатель, при котором производится от двух до пяти наблюдений. За окончательный результат принимается среднее значение измерений, при этом разница между отдельными отсчетами не должна превышать ± 2 мм [2].

В области автоматизированного деформационного инструментального мониторинга лидирующие позиции занимают компании Leica и Trimble, предлагая

наиболее передовые и завершенные решения. В последнее время появляются разработки отечественных ученых и научных организаций в этой сфере [25].

Одним из новейших подходов является долгосрочный фоновый мониторинг при помощи прибора GMS-Prism от компании GroundProbe [50], позволяющий вести измерения в безотражательном режиме.

Самая передовая линейка роботизированных тахеометров от компании Leica, это серия Nova – используемая для мониторинга смещений отражательных реперов на бермах и уступах карьера. Модели TM50 и MS60 имеют точность измерения углов 0,5", и 0,6 мм + 1 мм/км – точность измерения расстояния на призму. Технические характеристики позволяют этим моделям тахеометров измерять линейное расстояние на отражатель до 3,5 м, в безотражательном режиме до 1 км.

Для сбора, обработки и анализа данных мониторинга о текущем состоянии откосных сооружений бортов карьера, компанией Leica разработано программное обеспечение Leica GeoMoS, которое позволяет комбинировать данные, получаемые различными датчиками (GNSS-приемниками, тахеометрами, геотехническими и метеорологическими сенсорами) [3].

Программное обеспечение Leica GeoMoS включает в себя несколько специализированных модулей: GeoMoS Monitor, GeoMoS Analyzer, GeoMoS HiSpeed и др.

Leica GeoMoS Monitor обеспечивает централизованное хранение всех измерений и результатов их обработки в открытой базе данных SQL. Данные могут быть использованы приложениями Leica GeoMoS Analyzer, Leica GeoMoS Adjustment, а также сторонними программными продуктами.

Программное обеспечение Leica GeoMoS предлагает широкие возможности по настройке и обладает модульной структурой, что позволяет пользователю приобретать определённый функционал под конкретные нужды. Также в программном обеспечении GeoMoS применена концепция лицензирования датчиков. Это означает, что программное обеспечение масштабируется согласно числу и типу задействованных в системе датчиков, и при необходимости функциональные возможности системы могут быть легко расширены.

Основным конкурентом компании Leica, специализирующейся на производстве роботизированных станций для деформационного мониторинга, является компания Trimble. Для мониторинга применяются тахеометры серии Trimble S7 и S9 модель Robotic с сенсором Long Range FineLock (точность наведения 10 мм на расстоянии 2,5 км). Модели данной серии доступны в двух модификациях: с угловой точностью 0,5'' или 1'' и с точностью измерения расстояний по призме $0,8 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм/км}$. Все тахеометры данной серии оснащены сервоприводом MagDrive.

Для сбора, обработки и анализа данных мониторинга о текущем состоянии откосных сооружений бортов карьера, компанией Trimble разработано программное обеспечение Trimble 4D Control для постоянного мониторинга и Trimble 4D lite для периодического [70].

Основные функциональные возможности программного обеспечения Trimble 4D Control включают:

- сбор данных от станций-мониторов в режиме реального времени и при постобработке;
- анализ полученных данных с формированием графиков и трендов;
- хранение данных в централизованной системе управления;
- предоставление данных потребителям;
- контроль состояния «Системы мониторинга» с генерацией тревожных сообщений при обнаружении критических отклонений.

Доступные модули программного обеспечения Trimble 4D Control:

- модуль постобработки оптических данных;
- модуль обработки оптических данных в реальном времени;
- модуль постобработки GNSS данных;
- модуль интеграции данных съемки;
- модуль GNSS RTK решений;
- модуль GNSS внезапных деформаций;
- модуль GNSS сетевых деформаций.

Ключевым компонентом системы деформационного мониторинга, отвечающим за интерпретацию результатов инструментальных наблюдений, является модуль Deformation monitoring (Мониторинг деформаций). Данный модуль предоставлен для анализа данных, полученных от программного процессора обработки – это могут быть данные тахеометрических наблюдений (в автоматическом режиме) или GNSS-данные, а также комбинированные данные обоих типов. Модуль обеспечивает предоставление данных о деформациях в виде числовых значений, графических схем (карт) или диаграмм, выполняет уравнивание, позволяет задавать исходные оси, относительно которых будут определяться смещения. Кроме того, в этом модуле задаются пороговые значения для сообщений о тревоге для значений деформаций, при повышении которых будет подаваться команда сигнализации диспетчеру карьера.

Плюсами обеих систем автоматизированного деформационного мониторинга является то, что они информируют пользователя о наличии предельных отклонений относительно заданных порогов и о чрезмерно быстрых изменениях положения объекта. Оповещение может осуществляться через электронную почту с использованием Wi-Fi или посредством SMS. Наиболее доступным способом оповещения является отправка SMS-сообщений, что позволяет оперативно информировать работников, находящихся в зоне потенциального риска деформации. Такая система функционирует, например, на карьере «Чукикамата» в Чили при разработке медно-порфирового месторождения, где работники могут быстро покинуть опасную зону.

Несмотря на подтвержденную эффективность системы непрерывного автоматизированного мониторинга в определённых условиях, её внедрение на карьерах в северных регионах России сталкивается с рядом технических и организационных проблем:

- необходимость создания специальных остекленных укрытий, с поддержанием климатического режима в зимнее время;
- необходимость закрепления на наблюдаемых участках большого количества отражателей, часто в опасных зонах (рисунок 8);
- в зимнее время года большое количество осадков приводит к образованию снежных сугробов в несколько метров, а частые отрицательные температуры к образованию наледи на призмах. Это приводит к потере видимости визирных целей,

расположенных на уступах карьера. В летнее время требуется регулярная очистка призм от пыли;

– ухудшение точности при наведении на цели за счет эффектов атмосферной рефракции, туманов, ветров;

– дорогостоящее оборудование в условиях ведения интенсивных горных работ требует проведения регулярных мероприятий, обеспечивающих его сохранность, в том числе и со стороны работающего в карьере персонала;

– проблемы с установкой и обслуживанием призм в труднодоступных местах;

– проблемы с повреждением или потерей призм во время взрывных работ и от осыпей.

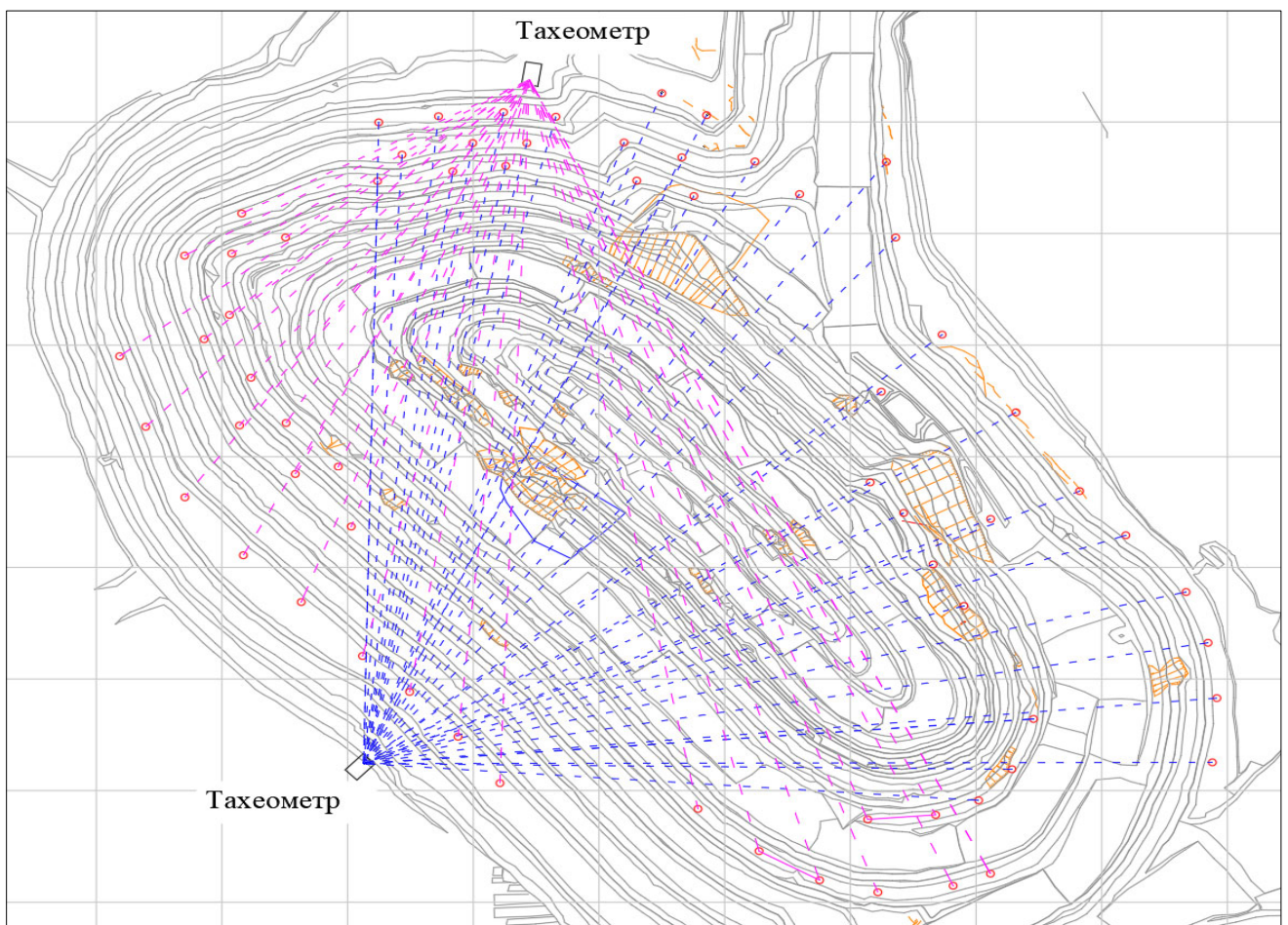


Рисунок 8 – Пример расположения отражателей при мониторинге с помощью роботизированных тахеометров

Таким образом, современные автоматизированные системы мониторинга на основе роботизированных тахеометров способны обеспечить непрерывный мониторинг объектов в течение всего года при условии внесения определенных корректировок и реализации специальных мероприятий. Однако реализация таких мероприятий может быть затруднительной. Более эффективным подходом является использование роботизированных тахеометров в качестве дополнительного метода в составе комплексной системы мониторинга стабильности бортов карьера.

1.2.2 ГНСС-технологии для мониторинга деформационных процессов

В настоящее время технологии глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) находят широкое применение в различных областях техники, включая мониторинг состояния прибортового массива карьера.

Использование методов спутниковой геодезии для решения задач мониторинга карьеров позволяет, во-первых, отказаться от традиционных измерений деформаций по профильным линиям и получать в результате измерений полный вектор смещения реперов, а во-вторых, значительно расширить границы исследуемых областей влияния горных работ, что в итоге позволяет на качественно новом уровне изучать деформирование верхней части земной коры, вызванное техногенными факторами [53, 24, 58].

Основными новаторами в применении ГНСС-систем для мониторинга являются крупные горнодобывающие предприятия. Среди зарубежных объектов можно выделить: карьеры Letlhakane, Venetia Diamond Mine, разрабатывающие кимберлитовые месторождения; карьер Highland Valley, разрабатывающий месторождение медных руд в Британской Колумбии, Канада [99]; карьер Megalopoli, Греция; Чукикамата, Чили; рудник Гразберг, Индонезия и др. Среди отечественных горных предприятий, активно использующих ГНСС-инфраструктуру для наблюдения за деформациями земной поверхности и горного массива, следует отметить: АК «АЛРОСА» карьер «Удачный»; шахта Сарановская-Рудная, разрабатывающая хромитовое месторождение на Среднем Урале; Таштагольский рудник (филиал

ОАО «Евразруда», горнорудного предприятия группы «ЕвразХолдинг»); карьер Центрального рудника ОАО «Апатит».

Ведущими отечественными научно-исследовательскими и производственными организациями, специализирующимися в данной области, являются: ОАО «ВНИМИ»; ОАО «ВостНИГРИ»; ООО «Генезис»; ЗАО НПП «НАВГЕОКОМ»; Институт горного дела УрО РАН; Институт горного дела СО РАН; ЗАО «ГЕОСТРОЙ-ИЗЫСКАНИЯ»; ФБГОУ ВО «СГУГиТ».

Зарубежными аналогами научно-исследовательских и научно-производственных центров являются: Геодезическая НИЛ (GRL) в Университете Нью-Брансуика (UNB), Канада; Канадский Центр Геодезических Разработок (CCGE); Институт Навигации, США; НИИ Инженерного строительства, Япония; Университет Yamaguchi, Япония; (WA) Высшая школа горных инженеров (Университет Curtin), Австралия; Афинский Национальный Технический Университет, Греция; Школа горных инженеров (Университет Витватерсранд), ЮАР; Leica Geosystems, Швейцария; ORION Monitoring Systems, Inc, США.

К настоящему времени накоплен значительный объем научно-практических разработок как в области аппаратной организации маркшейдерско-геодезических наблюдательных сетей, так и в сфере создания программных комплексов, обеспечивающих обработку и анализ данных, поступающей от деформационных датчиков [38, 30].

Среди ведущих производителей аппаратуры ГНСС, применяемой при построении систем сбора и обработки геопространственных данных следует выделить компании Leica Geosystems и Trimble.

Спутниковое позиционирование имеет ряд преимуществ в точности и производительности по сравнению с традиционной методикой проведения геодезических съемок. Сравнительная характеристика двух методов мониторинга сведена в таблицу 5.

Таблица 5 – Сравнительные характеристики ГНСС-наблюдений с традиционными методами

№	Сравнительный параметр	Спутниковые наблюдения	Традиционные инструментальные наблюдения
1	Климатические условия	«+» Практически не влияют	«-» Большое влияние на точность и возможность проведения работ (ветер и рефракция воздуха приводит к снижению точности, сильный дождь и низкие температуры исключают проведение работ, сугробы снега перекрывают видимость между пунктами)
2	Точность на значительных расстояниях	«+» Практически не зависят от расстояния	«-» С увеличением расстояний между пунктами точность снижается, так как увеличиваются ошибки наведения на цель
3	Взаимная видимость между пунктами	«+» Не требуется. Это позволяет эластично приспособить наблюдательную станцию к местам наиболее опасных участков	«-» Является обязательным условием. Это усложняет геометрию наблюдательной сети
4	Производительность при масштабных съемках	«+» Идеальные условия работы на больших пространственно-временных базах	«-» Требуется проведение трудоемких ходов полигонометрии и нивелирования, установки опорных и промежуточных пунктов
5	Наблюдения локальных участков	«-» Повышенная трудоемкость работ по сравнению с классическими способами	«+» Небольшие расстояния и густая сеть наблюдаемых реперов на конкретном участке наиболее подходят для классических способов наблюдений, как с точки зрения точности, так и производительности
6	Камеральная обработка данных	«+/-» Трудоемкость в зависимости от режима	«+/-» Трудоемкость в зависимости от методики

Применение высокоточных ГНСС-приемников кардинально решает проблему обеспечения требуемой точности измерений на значительных расстояниях, одновременно повышая общую производительность геодезических работ. Наибольшая эффективность достигается при комплексном использовании классических инструментальных и современных спутниковых методов. Как показали практические исследования, спутниковые наблюдения демонстрируют неоспоримое преимущество

по точности и производительности при создании крупномасштабных планово-высотных сетей и мониторинге протяженных объектов, в то время как электронные тахеометры остаются более эффективны при мониторинге локальных участков.

Вследствие этого, наиболее рациональная для условий отечественных карьеров схема имеет комбинированный вид. В ее рамках сеть опорных и основных реперов, расположенных по контуру карьера, переопределяется с помощью высокоточных ГНСС-наблюдений. В свою очередь, определение координат глубинных реперов и реперов на локальных участках осуществляется посредством геодезических измерений с пунктов созданной опорной сети.

Эффективность системы ГНСС-мониторинга, надежность получаемых результатов при минимизации экономических затрат и обеспечении требуемой оперативности работ достигаются при условии ее проектирования с учетом специфики развития деформационных процессов на конкретном объекте, с учетом особенностей развития деформационных процессов. Выявлению таких участков способствует предварительный анализ поля напряженно-деформированного состояния массива горных пород, основанный на знании распределения тензоров напряжений в пределах карьерного поля.

Высокая производительность метода ГНСС-наблюдений позволяет обеспечивать необходимую периодичность и своевременность измерений [65].

1.3 Применение спутниковой и наземной радарной интерферометрии при мониторинге карьеров, отвалов и дамб при разработке месторождений

В начале 2000-х гг., как результат поиска эффективной системы за наблюдением откосных сооружений, были разработаны радарные установки, позволяющие вести высокоточные наблюдения за смещениями в непрерывном режиме. Интерферометрический наземный радар был разработан в Университете Квинсленда (Австралия), специально для использования его на карьерах и разрезах [87]. В настоя-

щее время они используются в основном на предприятиях, ведущих разработку полезных ископаемых открытым способом, качественно решая геомеханические задачи мониторинга деформационных процессов горных работ.

Австралийская компания GroundProbe Ltd., впервые начала использовать радар для мониторинга склонов, представив в июне 2003 г. радар стабильности склона (SSR). Немного позже, в январе 2006 г., на рынок со своими радарами вышла Южно-Африканская компания Reutech Radar Sistem Ltd [68]. Более подробный сравнительный анализ этих систем представлен в одном из последующих разделов.

Наземные интерферометрические радары применяются для мониторинга сдвижений горного массива бортов карьера 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.

Скорость сканирования наблюдаемого участка на борту карьера зависит от типа радара, площади наблюдаемого участка, расстояния от места установки радара до борта, плотности сканирования (для таких моделей как Reutech MSR), а также метеорологических условий.

Наземные интерферометрические радары относятся к дистанционному площадному методу оперативного контроля за устойчивостью откосов, позволяющему регистрировать смещения горного массива с точностью до 0,1 мм на расстоянии до 5 км. Радар устанавливается на подготовленную площадку в непосредственной близости к бровке уступа карьера и ведет непрерывный автоматизированный мониторинг заданного участка на противоположном борту.

Полученные данные передаются в информационную систему для обработки и визуализации в виде участка борта, на который, в виде слоев, накладываются различные данные в виде тепловой карты. Специализированное программное обеспечение для работы радара и обработки данных позволяет подавать сигналы тревоги при выявлении уровней сдвижений, превышающих граничные значения, установленные пользователем.

Для мониторинга сдвижений откосов применяются радары двух типов, с реальной синтезированной решеткой (RAR) и синтезированной апертурной решеткой (SAR).

Важной технической особенностью является фотокамера, установленная на некоторых типах радарных систем, таких как GroundProbe SSR-FX, SSR-XT, IDS IBIS-ArcSAR и др. Данное конструктивное решение позволяет осуществлять панорамные снимки участка мониторинга, с последующим совмещением результатов радарного сканирования с фотографией. Это обеспечивает повышение точности интерпретации данных, детальную пространственную локализацию деформационных процессов и визуальную верификацию результатов мониторинга.

Значительным преимуществом является мобильность большинства современных радарных систем. Конструкция многих установок предусматривает их размещение на прицепных платформах или автотранспорт, что обеспечивает оперативное перемещение оборудования в безопасную зону при проведении взрывных работ и гибкость при развертывании системы мониторинга на различных участках. Современные разработки в области радарного мониторинга направлены на упрощение процедуры геодезической привязки оборудования на местности, усовершенствования алгоритмов обработки данных и интеграцию программного обеспечения с другими системами мониторинга, в частности с приземными и спутниковыми системами наблюдений.

Метод наземной радарной интерферометрии обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с другими известными методами наблюдений, а именно:

- мониторинг выполняется в режиме реального времени с настраиваемой системой оповещения о деформациях;
- высокая информативность – наблюдения ведутся со сплошной зоной покрытия, а не только в специально закрепленных точках;
- дистанционность наблюдений дает возможность производить измерения, в том числе, на труднодоступных и опасных участках;

- возможность выполнять съемку в любое время суток, независимо от освещенности, в условиях облачности и тумана;
- возможность достижения миллиметрового (и субмиллиметрового) уровня точности.

К недостаткам относятся более высокая стоимость относительно других систем мониторинга, а также то, что величины смещений определяются вдоль линии визирования без получения полных векторов смещений.

InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) – это метод, используемый для обработки радиолокационных изображений, с помощью радаров с синтезированной апертурной решеткой, полученных со спутников. Метод основан на интерферометрической обработке одной или нескольких пар радиолокационных изображений одной территории, полученных с различных орбитальных позиций (при известных и точно определенных параметрах орбиты). Комбинация двух изображений РСА одного и того же участка полученная с разных орбит, т. е. под разными углами падения, дает интерферограмму, несущую информацию о фазовых сдвигах сигнала.

InSAR является хорошо апробированной технологией, позволяющей производить мониторинг смещения земной поверхности и инженерных сооружений с высокой точностью [57, 9].

За последние два десятилетия технология InSAR получила значительное развитие, что связано с развертыванием специализированных спутниковых группировок: ERS1/2 и ENVISAT ASAR (Европейское Космическое Агенство), JERS-1 SAR (Японское Агенство Аэрокосмических Исследований), RADARSAT-1/2 (Канадское Космическое Агенство), TerraSAR-X и TanDEM-X (Infoterra, Германия), и COSMO-SKYMed (Итальянское Космическое Агенство) [106, 44].

Данное развитие обеспечило научное сообщество большим количеством данных, на основе которых были разработаны усовершенствованные алгоритмы обработки, такие как Permanent Scatters (PS) и Small Baselines (SBAS), позволяющие получать высоконадежные карты скоростей смещения.

Метод интерферометрического анализа спутниковых радарных снимков InSAR позволяет осуществлять мониторинг оседаний больших площадей земной поверхности для оценки их деформированного состояния [71, 37]. Однако метод обладает рядом ограничений, связанных с минимальной площадью исследуемого участка, требованиями к характеру земной поверхности и перепадам высот рельефа.

Например, радары немецкой и испанской группировки спутников TerraSAR-X получают изображение в виде полосовой карты с разрешением 3 x 3 м, с площадью покрытия 30 x 50 км, и периодом повторного сканирования 11 дней. Представленные данные актуальны для северных частей России.

Существенным фактором, ограничивающим применение InSAR в условиях севера, является наличие сезонного снежного покрова. Снег значительно снижает когерентность радиолокационного сигнала, что делает зимние съемки малоприменимыми для интерферометрического анализа, несмотря на существование алгоритмов коррекции, использующих данные спектрорадиометров среднего разрешения (например, MODIS). Для северных частей России, где продолжительность залегания снежного покрова может достигать 8-9 месяцев в год, это существенно сокращает количество получаемых с радара данных.

Однако для минимизации влияния снежного покрова могут быть предприняты эффективные контрмеры – развертывание на исследуемой территории сети искусственных уголковых отражателей (рисунок 9). Отражатели устанавливаются таким образом, чтобы постоянно находиться над уровнем снежного покрова и обеспечивать отражение как в направлении восходящего, так и в направлении нисходящего пролета спутника. Это позволяет сохранять высокую когерентность сигнала и получать высококачественные данные в течение всего года.



Рисунок 9 – Угловой отражатель, установленный на заснеженной территории

На рисунке 10 представлены полярные диаграммы, характеризующие сезонную динамику интерферометрической когерентности для карьерного массива, расположенного в Северо-Енисейском районе Красноярского края. Каждый сектор диаграммы соответствует среднему значению когерентности для интерферометрических пар, обработанных за соответствующий временной интервал. Левая диаграмма отражает данные, полученные при восходящем пролете спутника, правая – при нисходящем.

Более длинные и светлые сегменты соответствуют повышенным значениям когерентности, что указывает на более высокое качество и надежность InSAR измерений в данные периоды.

Анализ диаграмм выявляет выраженный сезонный тренд. Периоды минимальной когерентности – это ранняя зима и весна, с октября по май, поскольку в этот период обычно сильнее изменяется почвенный покров, формируется и деградирует сезонный снежный покров, изменяется влагонасыщенность верхних слоев грунта, происходят криогенные процессы. Разница менее заметна на восходящем графике,

поскольку большая часть области сканирования покрыта лесом, который имеет низкую или переменную когерентность в течении всего года. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о существенном влиянии сезонных факторов и типа земного покрова на качество спутниковых интерферометрических измерений.

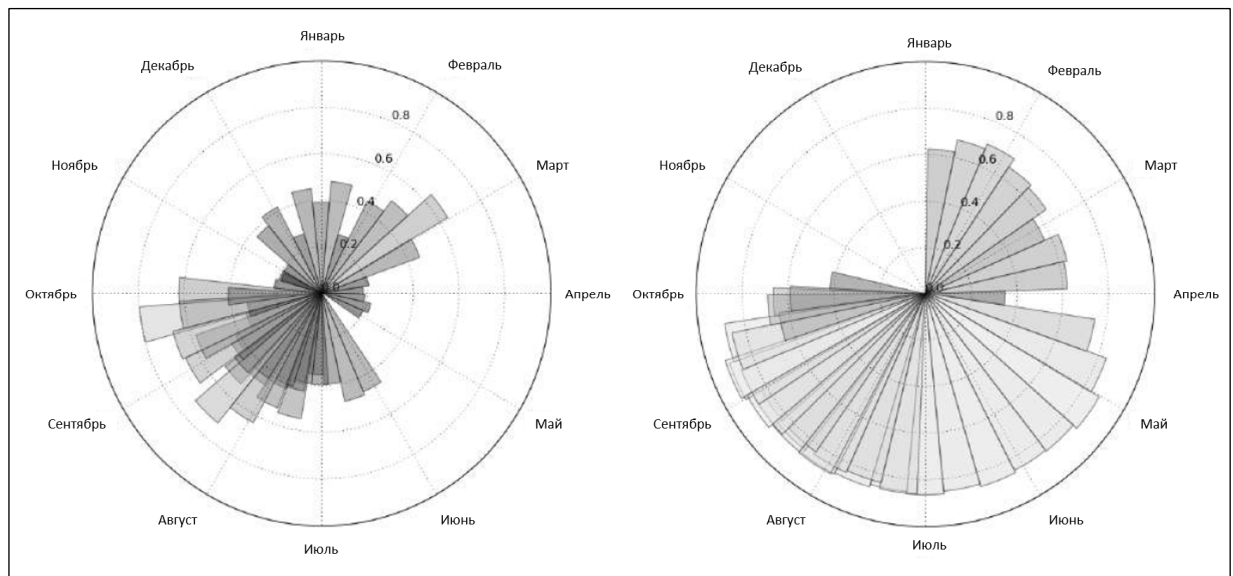


Рисунок 10 – Графики интерферометрической когерентности в течение года

На рисунке 11 представлен пример обработки данных спутниковой радиолокационной интерферометрии, выполненный компанией 3vGeomatics [67]. Визуализация отображает карту абсолютных скоростей смещений земной поверхности в диапазоне от 0 до 25 см/год, геопривязанную и наложенную на картографическую подложку Google Earth. Анализ результатов выявил существенную зависимость качества и полноты данных InSAR от характера земного покрова. Высокая концентрация растительности на прилегающих к карьере территориях приводит к явлению декорреляции радиолокационного сигнала, что делает обработку интерферометрических данных крайне ненадежной. Вследствие этого, значимые результаты были получены преимущественно для открытых участков, подверженных непосредственному техногенному воздействию. Как видно, наиболее интенсивные смещения наблюдаются в области формируемых отвалов, что объясняется процессами уплотнения и ползучести насыпных грунтов.

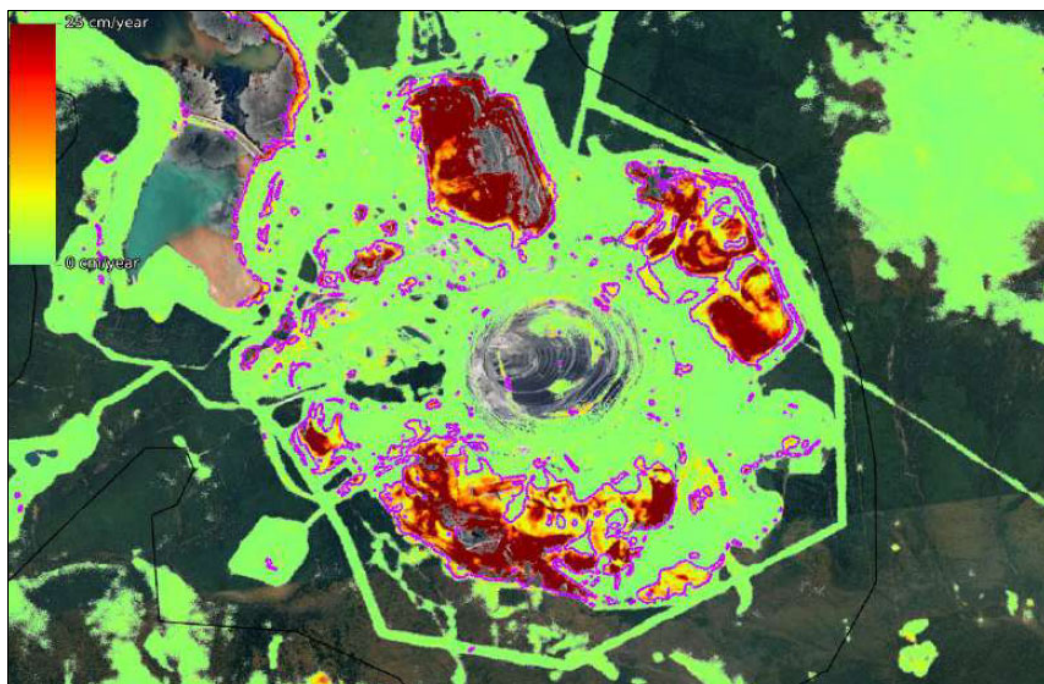


Рисунок 11 – Пример сканирования InSAR

Метод InSAR демонстрирует высокую эффективность при мониторинге медленных и распределенных на большой площади деформационных процессов, таких как оседание отвалов и просадки дамб хвостохранилищ.

Однако для задач оперативного мониторинга устойчивости бортов глубоких и сверхглубоких карьеров его применение имеет фундаментальные ограничения. Временной интервал сканирования территории от нескольких дней до недель часто превышает характерное время развития критических деформаций в крутых откосах карьера. Это делает метод непригодным для оперативного обнаружения и прогнозирования быстротекущих деформаций. К тому же глубина карьера негативно сказывается на результатах обработки данных спутниковой интерферограммы, что еще раз доказывает, что метод не является актуальным в условиях разработки глубоких и сверхглубоких карьеров.

1.4 Обзор существующих наземных интерферометрических систем сканирования

Наземные интерферометрические радарные системы (GB-InSAR/InRAR) приобрели широкое распространение в практике мониторинга устойчивости бортов на

карьерах и рудниках всего мира. Данная технология применяется как на зарубежных месторождениях, разрабатываемых крупными горнодобывающими компаниями, так и на отечественных. Это связано с рядом неоспоримых преимуществ радарных систем в сравнении с другими видами измерений [27, 113].

В литературе приведены примеры успешной эксплуатации радарных установок на горнорудных предприятиях зарубежных и отечественных компаний [18].

На мировом рынке поставщиков решений в области наземного интерферометрического сканирования лидирует ограниченное число компаний, что связано с высоким технологическим порогом входа в отрасль. Ключевыми производителями являются IDS (Италия), входящая в корпорацию Гексагон, Groundprobe (Австралия), Routech (ЮАР) и весьма редко LISA (JRC-Lisalab) и GPRI (Gamma Remote Sensing). Стоит отметить, что радары IDS компании Гексагон и GroundProbe получили наибольшее распространение в России, судя по открытым данным об оснащении горнодобывающих предприятий (рисунок 12) [18, 23, 89].



Рисунок 12 – Варианты исполнения наземных интерферометрических радаров:

а) IDS ArcSAR; б) GroundProbe SSR-XT; в) IDS IBIS-FM; г) Reutech MSR

На текущий момент на рынке геотехнического мониторинга Российской Федерации отсутствуют серийно производимые отечественные решения в области наземного интерферометрического сканирования для нужд гражданской промышленности. Можно предположить, что существующие разработки остаются неизвестными широкому кругу специалистов горных предприятий и научно-исследовательских организаций ввиду их узкой специализации, экспериментального статуса или отсутствия коммерческих моделей радаров [109].

Наземные интерферометрические радары отличаются друг от друга типом антенны (рупорная, параболическая, линейная), технологией сканирования (реальная, синтезированная апертура) [31], дальностью (от 600 м до 5 км), скоростью сканирования (от 2 до 30 мин на одно сканирование) и методом исполнения (стационарные, мобильные или установленные на базу автомобиля).

Задача радаров заключается в проведении дистанционных, непрерывных, высокоточных измерений расстояний до поверхности бортов карьера с целью вычисления текущих значений приращений длин линий, необходимых для мониторинга движения наблюдаемых откосов бортов и уступов.

В основе интерферометрического сканирования лежит схема, при которой высокочастотная электромагнитная энергия (радиоволна) излучается в направлении борта карьера, отражается от него, и затем регистрируется приемо-передающим устройством радара. Из разности фаз радиоволны получают необходимую информацию о наблюдаемом склоне – расстояние и смещение.

Антенна радара является активным датчиком и излучает импульс в направлении наблюдаемого объекта с частотой 10–17 ГГц. Одна часть электромагнитных волн, достигая наблюдаемого объекта, поглощается, а другая отражается в сторону радара. Интерферометрический анализ позволяет получить данные о смещении наблюдаемого объекта путем сравнения информации, собранной в разное время, о сдвиге фаз отраженного от объекта сигнала. Величина смещения прямо пропорциональна величине разности фаз [18].

Луч радара, формируемый антенной, может иметь различную форму. На рисунке 13 представлены три основных типа антенн, используемых в наземном интерферометрическом сканировании в настоящее время [83]. Каждый тип характеризуется специфическими диаграммами направленности, коэффициентом усиления и разрешающей способностью, что определяет их применимость для различных задач мониторинга.

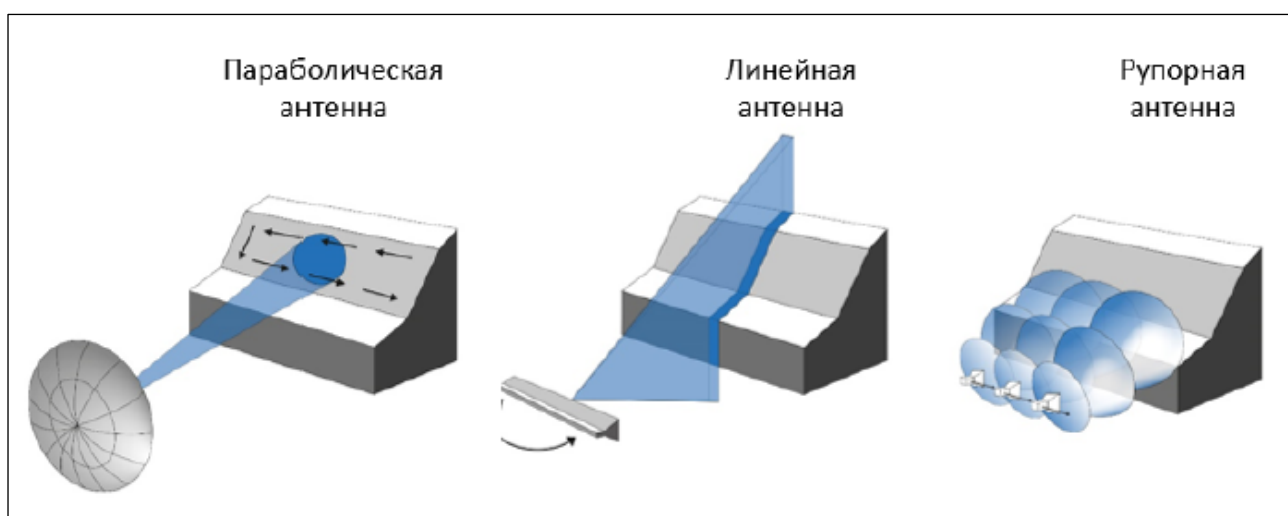


Рисунок 13 – Основные типы антенн наземных интерферометрических радаров

Первый тип – это антенна параболической тарелочной формы, которая формирует узкий конусообразный луч, движущийся по азимуту и углу (слева направо и сверху вниз). Радары с такой антенной относятся к радарам с реальной апертурной решеткой (RAR) [29]. Наиболее распространенные модели таких радаров – это Reutech MSR Modular и Groundprobe SSR-XT.

Второй тип – это антенна линейного типа. Такая антенна перемещается только по азимуту, формируя узкий веерообразный луч на склоне карьера. Известные модели таких радаров – Groundprobe SSR-FX и SSR-OMNI.

Третий тип имеет рупорную антенну, которая создает широкий конусообразный луч, охватывающий сразу большую площадь. Эти радары работают по принципу синтезированной апертурной решетки (SAR). Примером таких радаров являются Groundprobe SSR-SARX и IDS IBIS-FM [75].

Каждый тип антенны имеет свои преимущества и недостатки. Выбор радарной системы для мониторинга устойчивости откосов карьеров определяется задачами и стратегией наблюдений. Выделяют две основные стратегии мониторинга устойчивости откосов: целевой мониторинг и мониторинг обширной территории. Целевой мониторинг является тактическим, сосредоточенным на известных зонах повышенного риска, критических для безопасности. Для реализации данной стратегии оптимально применение 3D-радаров с параболической антенной и реальной апертурной решеткой. Данные системы обеспечивают высокое пространственное разрешение при мониторинге отдельных участков и минимально подвержены влиянию атмосферных помех [28].

Мониторинг обширной территории, он же стратегический, охватывает большие площади бортов карьера с целью выявления новых опасных зон. Для данной стратегии характерны длительные сеансы сканирования, с целью определения больших опасных зон или медленно развивающихся деформаций. При стратегическом мониторинге предпочтительны 2D-радары с синтезированной или реальной апертурой с линейной или рупорной антенной.

Дальнейшее представление и визуализация результатов сканирования различается в зависимости от типа антенны и, как следствие, модели радара а также используемого программного обеспечения.

В радиолокационных измерениях выделяют два типа определяемых расстояний: абсолютное и относительное.

Абсолютное расстояние – это величина, характеризующая полный путь распространения электромагнитной волны от приемо-передающего устройства (ППУ) до наблюдаемого объекта и обратно (рисунок 14). Определяется по фазе отраженного сигнала относительно опорного колебания.

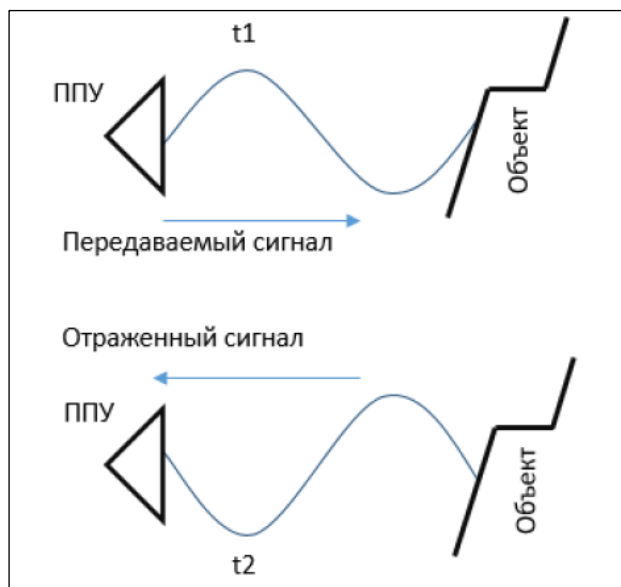


Рисунок 14 – Схема измерения абсолютного расстояния

Рассчитывается по формуле:

$$\frac{(t_1+t_2) \times c}{2}, \quad (1)$$

где c – скорость света, (м/с);

t_1 – время, за которое радиоволна распространяется от ППУ до измеряемого объекта, с;

t_2 – время, за которое отраженная радиоволна распространяется от измеряемого объекта до ППУ, с.

Современные интерферометрические радары позволяют определять абсолютное расстояние с точностью до 0,1 м. Это расстояние используется для построения трехмерной модели сканируемого борта карьера, а также для привязки радарных измерений к системе координат месторождения. Величина абсолютного расстояния не используется для определения смещения горного массива.

Смещение объекта мониторинга, называемое также относительным расстоянием, определяется на основе анализа фазовой информации радиолокационного сигнала, что обеспечивает субмиллиметровую точность измерений.

На левой части рисунка 15 изображено первоначальное сканирование объекта, где ППУ радара излучает сигнал до наблюдаемого объекта и регистрирует обратный сигнал, соответствующий фазе сканирования φ_1 . При первом цикле сканирования объект мониторинга является неподвижным. На правой части рисунка 15 объект мониторинга смещается по направлению к ППУ радара, и регистрируется фаза сканирования φ_2 . При обработке результатов измерений появляется фазовый сдвиг $\varphi_2 - \varphi_1$. Современные интерферометрические радары, работающие в частотном диапазоне около 10 ГГц при фазовом сдвиге в 5° , способны фиксировать смещение сканируемого объекта до 0,2 мм [73]. Величина линейного смещения объекта d рассчитывается по формуле:

$$d = -\frac{\lambda}{4\pi}(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (2)$$

где λ – длина волны.

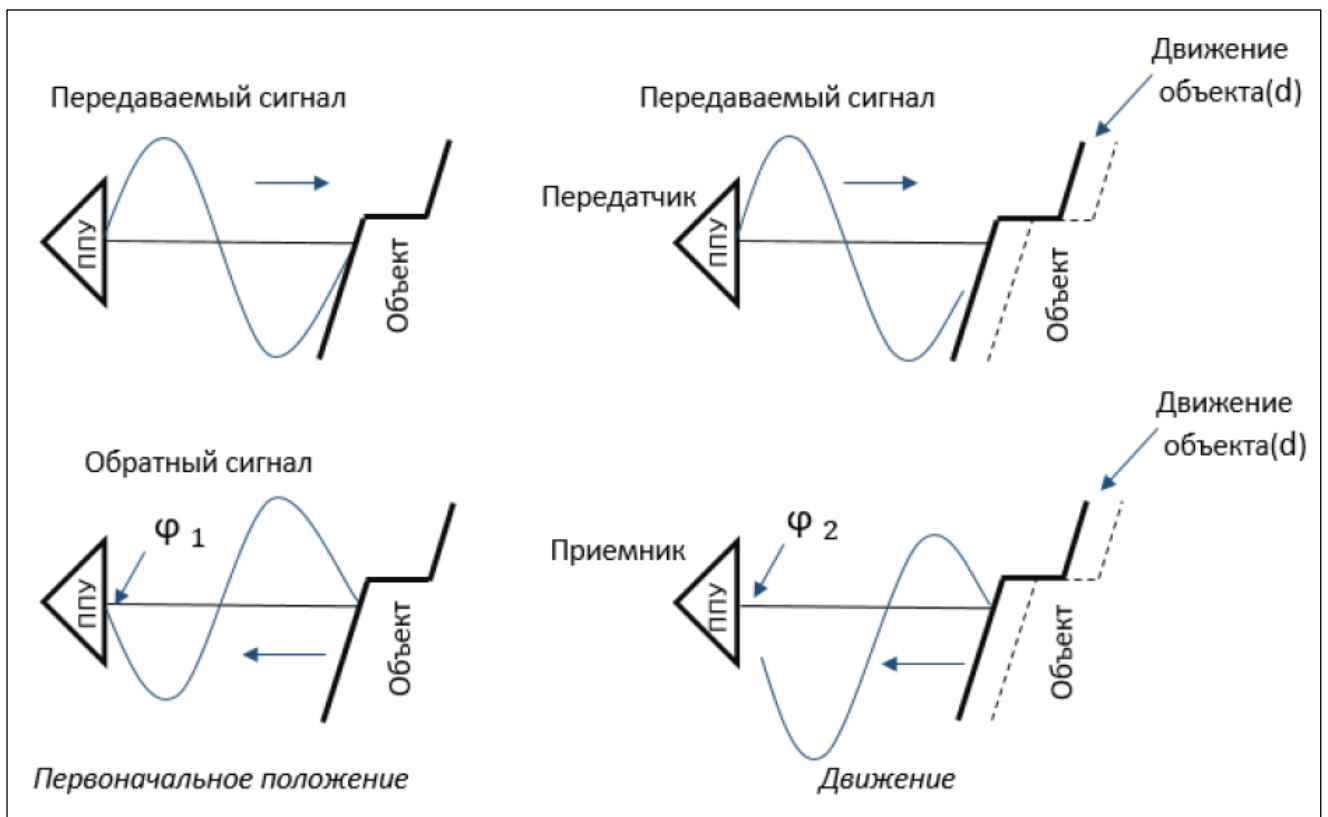


Рисунок 15 – Схема измерения относительного расстояния

Карта разности фаз двух и более измерений $\Delta\varphi$ является интерферограммой сканирования. Каждый пиксель интерферограммы содержит информацию о фазовом сдвиге для соответствующего элемента разрешения на местности (рисунок 16). Если между сканами не произошло никакого движения, фазовый угол входящего сигнала останется неизменным и будет постоянным. При наличии смещения объекта возникает пропорциональная ему разность фазовых углов, которая может быть преобразована в величину линейного смещения по линии визирования. Таким образом, анализ пространственного распределения разности фаз для каждого пикселя по паре снимков позволяет построить карту деформации земной поверхности и провести ее последующую геометрическую и физическую интерпретацию.

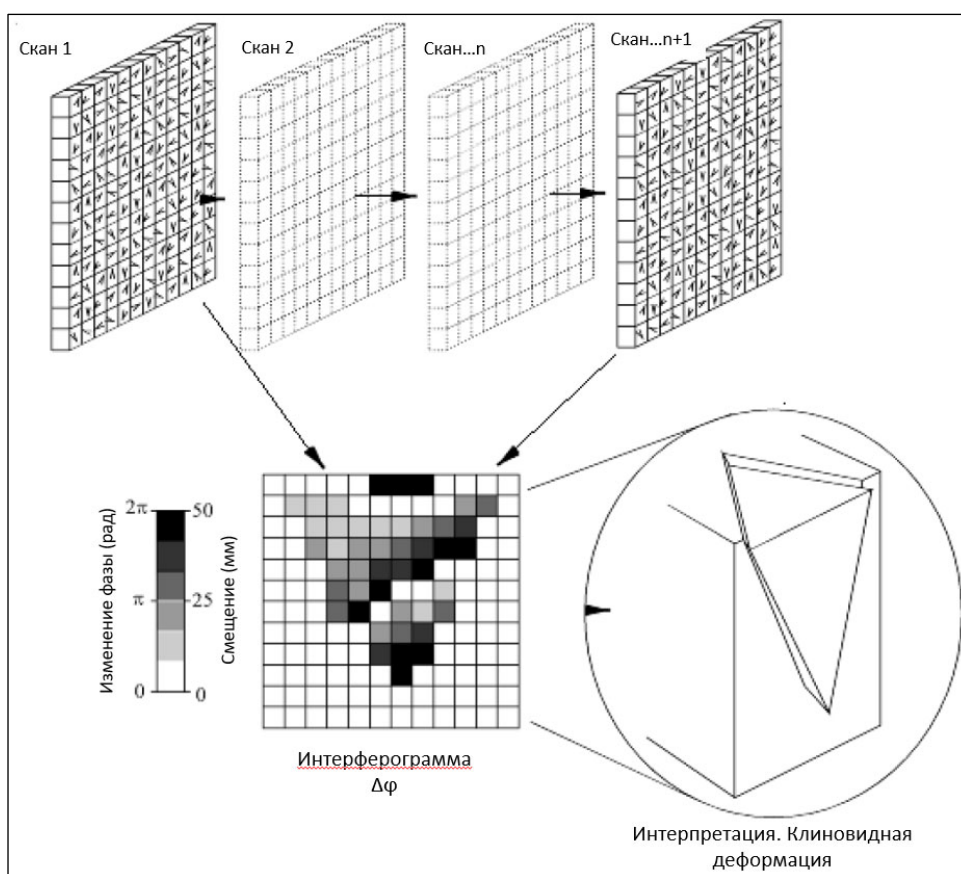


Рисунок 16 – Получение интерферограммы сканирования

Анализ радаров разных производителей показал, что в целом интерферометрические радары по своим характеристикам, несмотря на разные технологические

решения, достаточно близки между собой. В то же время, имеются принципиальные различия в функциональности программного обеспечения для обработки данных и в уровне предоставляемой технической поддержки. Совокупность данных факторов оказывает непосредственное влияние на эффективность и достоверность оперативного мониторинга, результаты которого являются критически важными для обоснования и последующего принятия технических решений.

1.5 Основные отличия радаров с реальной и синтезированной апертурными решетками. Плюсы и минусы

Важно отметить, что в основе работы всех интерферометрических радаров лежит единый базовый физический принцип обработки сигналов, основанный на анализе фазовых сдвигов – радиолокационная интерферометрия. Однако по технологии сканирования современные интерферометрические радары подразделяются на две основные группы: SAR (Synthetic-aperture radar) – радары с синтезированной апертурной решеткой и RAR (Real Aperture Radar) – радары с реальной апертурной решеткой [75].

Радар с синтезированной апертурной решеткой (SAR) изначально был предназначен для использования с самолетов и спутников, его можно использовать для создания карт местности, высококачественных цифровых моделей рельефа и детектирования смещения протяженных площадных объектов.

Наземные радары этого типа (GB-SAR) осуществляют сканирование всей области большое количество раз во время одного цикла измерений. Ячейки (пиксели) получаются за счет последующей математической обработки данных внутри вычислительного блока системы радара. В отличие от SAR-систем, радары с реальной апертурой (RAR) выполняют измерения последовательно, сканируя каждую ячейку (пиксель) один раз. Сравнительная схема принципов работы SAR и RAR-радаров представлена на рисунке 17.

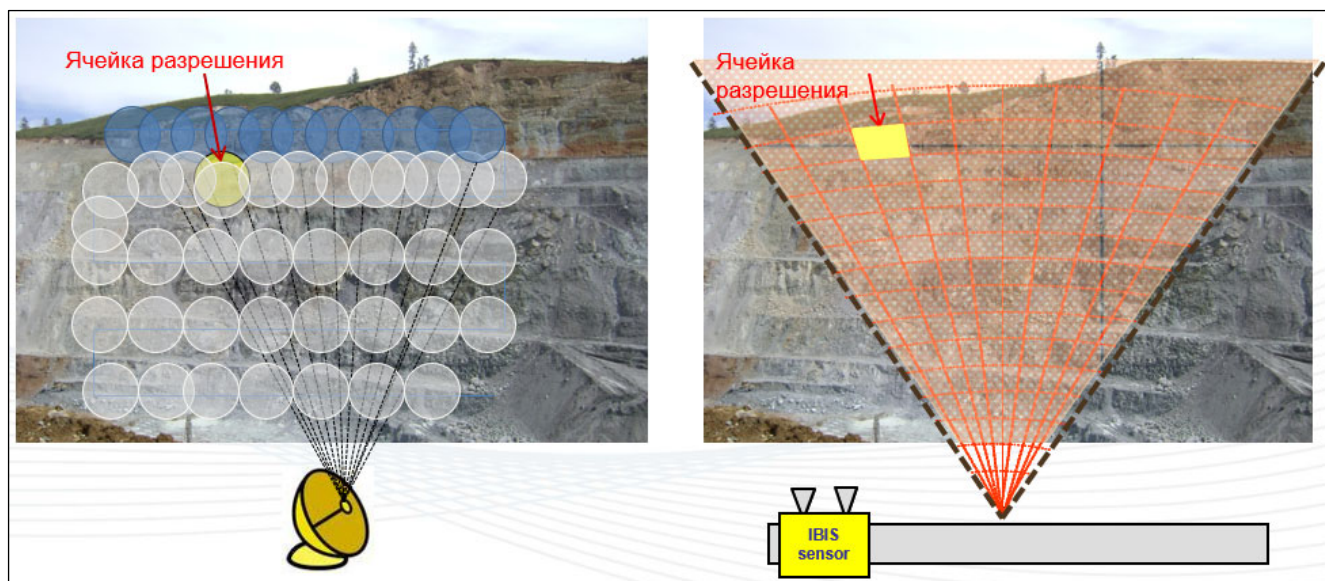


Рисунок 17 – Принцип сканирования RAR и SAR радаров

Радары с синтезированной апертурой (SAR) являются одновременно широкоформатными и целевыми радарными, поскольку могут сканировать большие области с высоким разрешением – применение различных типов антенн и их замена в процессе работы не требуется. Благодаря этому SAR-радары эффективно применяются для непрерывного мониторинга обширных областей с целью идентификации и отслеживания развития новых потенциально опасных зон, подверженных деформационным процессам.

Скорость сканирования заданного участка радаром с синтезированной апертурой (SAR) существенно превышает (в 2–5 раз, в зависимости от площади сканируемой области и требуемого разрешения) аналогичный показатель для радарных систем с реальной апертурной решеткой (RAR).

Технология пространственного разрешения антенн с синтезированной апертурой представлена на рисунке 18, на примере радара для мониторинга стабильности уступов IDS IBIS-FM. Данный радар представляет собой модульный стационарный комплекс дальнего действия, способный производить сканирование бортов карьеров на дистанции до 5 км.

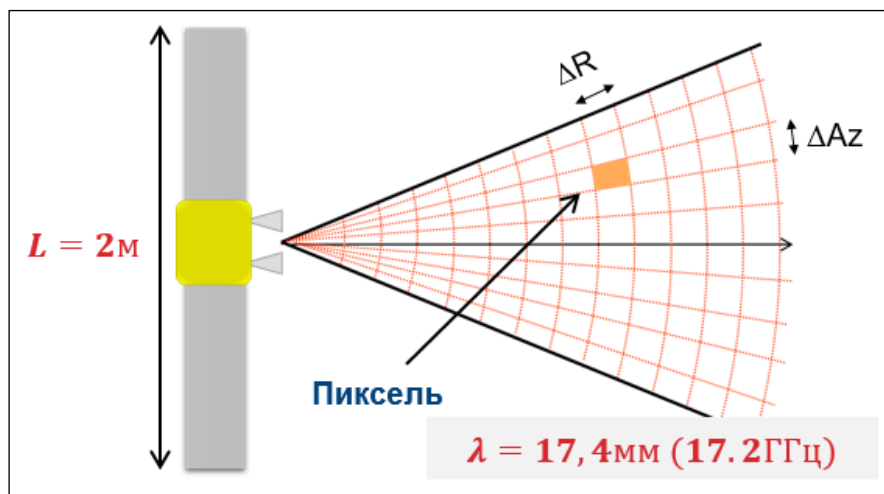


Рисунок 18 – Технология пространственного разрешения антенн с синтезированной апертурой

Размер одной ячейки (пикселя) рассчитывается по формуле:

$$\Delta Az = \frac{\lambda}{2L} = 4,3 \text{ mrad} , \quad (3)$$

где ΔR – длина одного пикселя, является фиксированной величиной ($\Delta R = 0,75 \text{ м}$);

L – длина рельса радара;

λ – длина волны, составляет 17,4 мм (17,2 ГГц);

ΔAz – ширина одного пикселя, зависит от удаленности сканируемого объекта.

На расстоянии 1 км составляет примерно 4,3 м.

Таким образом, разрешающая способность системы на дистанции 1 км характеризуется размером элементарной ячейки (пикселя) 0,75 м на 4,3 м.

Технологию работы радара с реальной апертурной решеткой рассмотрим на примере радара Reutech MSR300, который при радиолокационном сканировании борта карьера использует метод перекрывающихся измерений (рисунок 19). Суть метода заключается в наложении точек измерений на фиксированную пространственную сетку, угловой шаг которой задается пользователем. Минимальное расстояние между точками по азимуту составляет 0,25 градуса, интервал угла места – 0,75 градуса. Минимальное расстояние между точками после проведения обработки в специализированном ПО составляет 0,025 градуса.

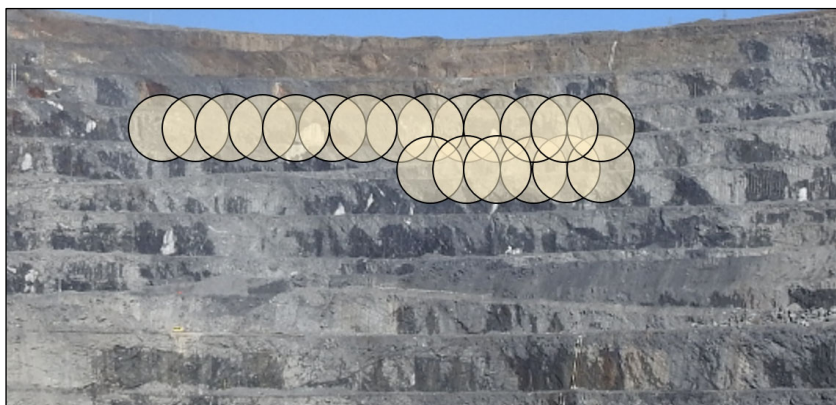


Рисунок 19 – Пример схемы сканирования радара Reutech MSR300

Ширина луча и размер шага зависит от расстояния, на котором радар установлен от наблюдаемого объекта (борта карьера). Так, на дистанции 100 м ширина луча на борту карьера составляет 3,1 м, а на расстоянии 2 500 м 78,5 м (таблица 5). На практике, чаще всего на открытых горных работах, радары используются на удалении от 500 до 1500 м от наблюдаемого участка. Соответственно ширина луча на склоне при таких расстояниях варьируется от 15 до 47 м [55].

Однако радар Reutech MSR300 позволяет одновременно и практически мгновенно измерять амплитуду и фазу отраженного радиолокационного сигнала в нескольких сотнях различных интервалов разрешения по дальности вдоль луча. Каждый интервал, длина которого не превышает один метр, называют «элементами разрешения по дальности» (рисунок 20). Все регистрируемые интервалы обрабатываются независимо друг от друга [83].

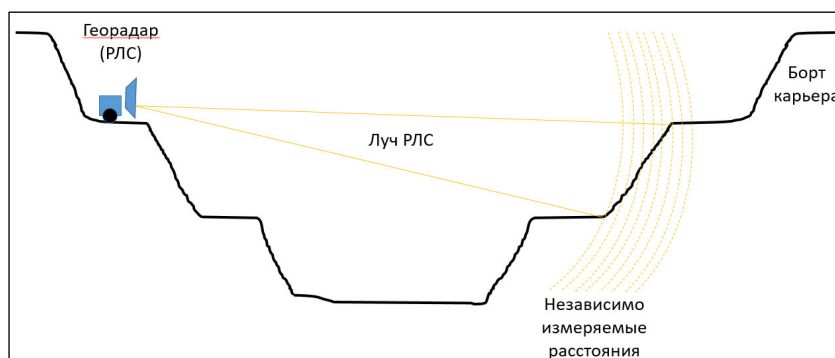


Рисунок 20 – Несколько независимо измеряемых расстояний (элементов разрешения по дальности) в пределах одного луча

Благодаря охвату одним лучом нескольких объектов, расположенных на разных расстояниях от антенны радара, встроенное программное обеспечение радара способно выдавать повышенное разрешение по углу места, путем проецирования данных движения на каждом расстоянии в виде трехмерной синтетической карты.

Таким образом, радар позволяет фиксировать и количественной оценивать деформации поверхности в пределах всей площади луча, а не только в его геометрическом центре.

Таблица 5 – Ширина луча и размер шага в зависимости от расстояния

	Расстояние (м)	Ширина луча на склоне (м)	Шаг 0,25 градуса (м)	Шаг 0,5 градуса (м)
MSR200 и MSR300	100	3,1	0,4	0,9
	500	15,7	2,2	4,4
	1 000	31,4	4,4	8,7
MSR300	1 500	47,1	6,5	13,1
	2 000	62,8	8,7	17,5
	2 500	78,5	10,9	21,8

Несмотря на более низкую скорость сканирования по сравнению с SAR-системами, ключевым преимуществом радаров с реальной апертурой (RAR) является генерация данных с пониженным уровнем шумов. Данное преимущество обуславливает их применение в условиях активной рабочей обстановки карьера, где работает много техники, обеспечивая максимальный уровень точности данных и минимальное присутствие в данных сканирования посторонних «шумов».

Известны случаи, когда SAR-радары демонстрировали существенное занижение значений реальных деформаций. Данный артефакт возникал в ситуациях, когда в соседних с деформацией пикселях находилось работающее оборудование, что является следствием характерного для SAR-технологии эффекта «размытия» между пикселями

при синтезировании апертуры. Для RAR-радаров данный недостаток не характерен, поскольку каждый пиксель формируется в результате независимого измерения.

В момент появления на рынке SAR-радаров, они очень быстро обрели популярность, благодаря своей невысокой стоимости. Однако в процессе эксплуатации и практических испытаний, горнодобывающие предприятия пришли к выводу, что достоверность и качество измерений играют более важную роль, чем экономия на оборудовании. В настоящее время SAR-радары применяются при мониторинге больших площадей и стратегического мониторинга. Несмотря на то, что технология радаров с реальной апертурной решеткой (RAR) была разработана более 20 лет назад, она до сих пор является наиболее предпочтительной, для контроля за деформациями, где ведется активная добыча полезных ископаемых.

1.6 Преимущества радарного мониторинга

над другими инструментальными методами в условиях низких температур

Для обеспечения круглогодичной эксплуатации роботизированных тахеометров на карьерах северных регионов России, необходимо применять специальные защитные конструкции, поддерживающие оптимальный температурный режим для функционирования оборудования. Это предотвращает образование инея на стеклах укрытий и исключает их запотевание. Однако это не решает проблемы с отражателями, которые постоянно находятся на открытом воздухе.

Отражательные призмы, в условиях активных работ в карьере подвергаются воздействию различных негативных факторов, таких как взрывы, камнепады, накопление пыли и грязи, а также сезонные изменения температуры. В летний период на них скапливается конденсат, а в зимний период времени они подвержены обледенению. Пример обледенения призм представлен на рисунке 21. Запотеванию и обледенению подвержены все призмы без исключения, даже оригинальные Leica GPR112, имеющие специальную мембрану для вентиляции и рекомендованные к использованию для мониторинга компанией Leica. Вследствие этого, большую

часть зимнего периода мониторинг посредством роботизированных тахеометром либо функционирует с перебоями, либо не функционирует вовсе. В северных регионах страны, где отрицательная температура воздуха сохраняется на протяжении восьми месяцев в году и более, система мониторинга не должна строиться на этом типе мониторинга, ввиду отсутствия достаточного количества данных. Данный тип мониторинга может быть использован только как вспомогательный.



Рисунок 21 – Обледенение наблюдательных призм в условиях низких температур. Красноярский край

В таблице 6 приведены данные проектного и фактического количества циклов измерений и измерений отражательных реперов роботизированными тахеометрами. Анализ выявил выраженную сезонную зависимость продуктивности мониторинга, с минимальной активностью в течении зимних месяцев и периодов сезонных переходов с значительными перепадами температур.

Так наименьшее количество циклов измерений, всего 12 из 124, было произведено в марте, и 21 из 124 в январе. В первом случае негативную роль сыграл период активных метелей, во втором – период максимально низких годовых температур.

Таблица 6 – Данные проектных и фактических циклов измерений и измеренных отражателей роботизированным тахеометром

Месяц	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Цикл проект	124	112	124	120	124	120	124	124	120	124	120	124
Цикл факт	21	33	12	55	84	111	103	87	97	51	34	51
Точки проект	7316	6608	7316	7080	7316	7080	7316	7316	7080	7316	7080	7316
Точки факт	1115	1888	613	3168	4902	6427	5614	5012	5639	2851	1915	2838

На основании данных таблицы 6 были построены диаграммы зависимости, визуализирующие динамику количества выполненных измерительных циклов и отдельных измерений отражательных реперов в разрезе календарных месяцев (рисунок 22).

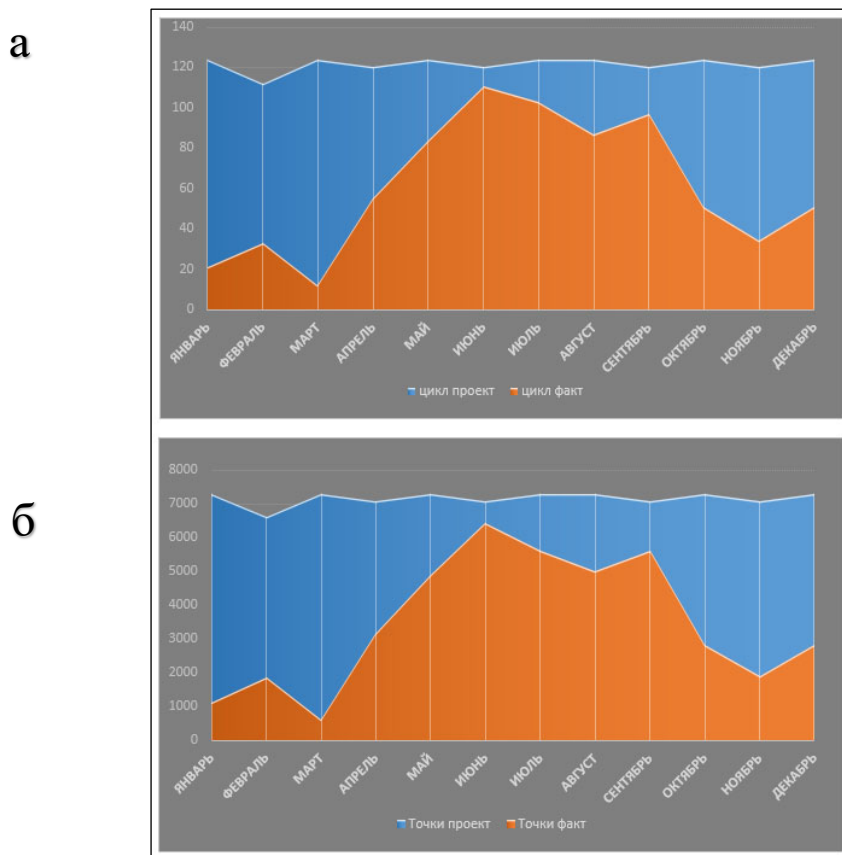


Рисунок 22 – Диаграммы зависимости: а) количества выполненных циклов измерений от месяца; б) реперов с отражателями

Полученные данные эмпирически подтверждают низкую эффективность и надежность мониторинга с использованием роботизированных тахеометров в зимнее время года.

Наземные интерферометрические радары, как уже отмечалось ранее, лишены этого недостатка, и позволяют сканировать борт карьера без размещения на борту карьера дополнительных датчиков (отражателей). Стандартная комплектация большинства радарных систем позволяет производить сканирование при температуре до -25 C° . При оборудовании радара дополнительными обогревающими элементами, которые защищают движущие части от замерзания, возможно использовать радар до температуры -50 C° . Данные решения предоставляют производители радаров, по согласованию с заказчиком.

Более того, радиоволна способна проходить через снег и даже иней на самом приемопередающем устройстве. Это свойство минимизирует влияние указанных атмосферных явлений на качество и непрерывность получения данных, что выгодно отличает радарную технологию от оптических методов.

Пример работы интерферометрического радара с обледененным ППУ в условиях низких температур показан на рисунке 23.

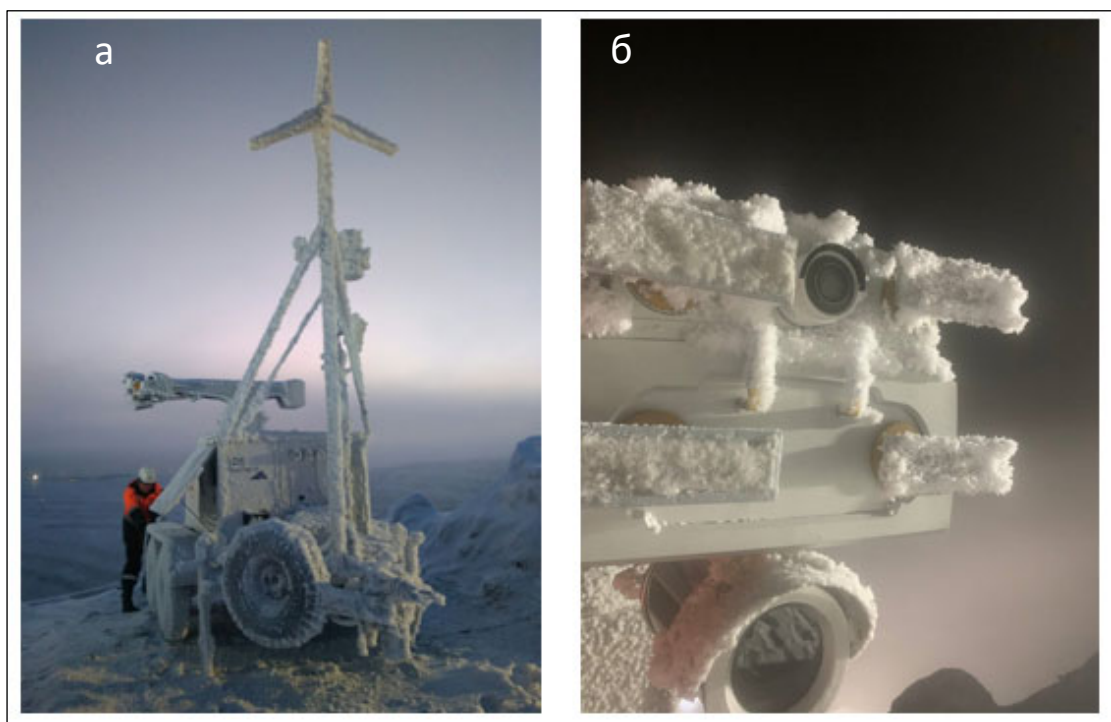


Рисунок 23 – Пример работы радара: а) обледенение радара б) ППУ радара

1.7 Распространенность технологии наземного интерферометрического сканирования на объектах отечественных компаний

В международной горнодобывающей практике радары применяются достаточно давно. Пионером в ее внедрении для контроля устойчивости уступов на карьерах выступила австралийская компания GroundProbe Ltd., которая в июне 2003 г. представила первую специализированную радарную систему для мониторинга склонов (Slope Stability Radar - SSR).

На территории Российской Федерации наземные интерферометрические радары стали применяться только с 2014 г. Одним из первых промышленных предприятий, апробировавших и внедривших данную технологию, стал АО «Ковдорский ГОК», установивший на карьере «Железный» радар компании IDS (Италия). К настоящему времени мониторинговая инфраструктура предприятия включает четыре радарные установки: три мобильных системы IBIS ArcSAR и одну стационарную систему IBIS FM. Пространственное расположение радаров спроектировано таким образом, чтобы обеспечить полное радиолокационное покрытие всех потенциально неустойчивых участков бортов карьера «Железный» [59].

Наиболее широкое распространение наземных интерферометрических радаров в глобальной горнодобывающей отрасли получили системы итальянского производителя IDS GeoRadar. Согласно данным компании, ее оборудование развернуто на более чем 120 карьерах по всему миру, а общее количество установленных радаров превышает 300 единиц. На территории России, по состоянию на текущий период, радарные системы IDS (модели IBIS-FM, IBIS ArcSAR, Hydra) эксплуатируются на предприятиях ключевых горнодобывающих компаний, включая АО «Ковдорский ГОК» (4 шт.), АО «Кузбассразрезуголь» (2 шт.), АО «СУЭК-Кузбасс» (1 шт.), АО «Михайловский ГОК» (1 шт.), АО «Лебединский ГОК» (1 шт.), ООО «Солнцевский угольный разрез» (2 шт.), АО Разрез «Шестаки» (1 шт.), АО «Карельский окатыш» (1 шт.), АО «Полюс Красноярск» (2 шт.), ПАО «АЛРОСА»

(3 шт.). Всего на объектах российских компаний работают 18 единиц радаров различных модификаций.

Вторым по степени распространения на российском рынке является южноафриканский производитель Reutech. Общее количество развернутых систем данного бренда оценивается в 7 единиц, которые установлены на объектах компаний АО «Полюс» (6 шт.), Norgold разрез «Березовский» (1 шт.).

Третью позицию занимает австралийская компания GroundProbe. Ее оборудование используется на таких предприятиях, как АО «Полюс» (3 шт.), АО «Черниговец» (3 шт.), АО «СУЭК-Кузбасс» (1 шт.), АО «Полиметалл» (4 шт.), АО «Серебро Магадана» (1 шт.). В сумме на карьерах отечественных компаний находятся 12 радаров компании GroundProbe (SSR-XT, SSR-FX, SSR-SARX, SSR-OMNI), исключая радарные системы для подземной добычи (GML).

В нормативно-правовом поле Российской Федерации наземные интерферометрические радары классифицируются как средства измерений, что подтверждается приказами Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии [43, 42].

По заявлению профессора Зотеева В. Г., на большинстве рудных карьеров современной России система мониторинга полностью разрушена. По его мнению, одной из главных причин развала системы мониторинга, кроме низкого уровня подготовки специалистов, является отсутствие специального оборудования, что при более чем скромных штатах геолого-маркшейдерской службы исключает возможность выполнения необходимого объема работ. С недавнего времени крупные горнодобывающие компании пытаются исправить ситуацию, сложившуюся в вопросах мониторинга бортов и уступов карьера [15]. Реализуется это, в основном, за счет приобретения современных высокотехнологичных приборов для мониторинга. Практический опыт использования наземного радиолокационного сканирования показал высокий уровень технического исполнения и надежности, апробированный на многих горнодобывающих территориях по всему миру.

Однако зависимость от импортных технологических решений создает существенные риски. Вследствие того, что все современные решения в области радиолокационного сканирования, оборудование и ПО являются результатом зарубежных разработок, их доступность для российских предприятий ограничена введением санкционных режимов и прекращением официальных поставок. Стратегическим решением данной проблемы является разработка и сертификация подобного оборудования силами российских научно-исследовательских институтов и компаний, специализирующихся в области радиолокационного приборостроения [74].

1.8 Системы улавливания камнепадов и обвалов

Практически всегда на глубоких карьерах, ведущих разработку полезных ископаемых открытым способом, существует проблема камнепадов на транспортные коммуникации (сезды) и рабочие площадки с вышележащих горизонтов [14].

Падение отдельных кусков породы представляет собой значительную геотехническую угрозу для работающих в карьере людей и оборудования и увеличивает риск их повреждения. Падение даже небольших обломков горной массы весом всего несколько килограмм могут привести к смертельным травмам персонала, в то время как более крупные камнепады, включающие несколько сотен тонн породы, способны нанести серьезный ущерб горнодобывающему оборудованию и объектам и привести к экономическим простоям, вследствие остановки ведения горных работ из соображений безопасности [78].

Для количественной оценки данного вида риска в мировой практике применяется концепция минимального практически приемлемого уровня риска – ALARP (As Low As Reasonably Practicable), Термин был введен в 1988 г. группой инженеров из Великобритании. Математическая модель для его расчета представлена формулой [94]

$$RD = Ph \cdot Ps \cdot Pt \cdot V , \quad (4)$$

где RD – уровень риска;

P_h – вероятность существования источника опасности;

P_s – пространственная вероятность нахождения человека на пути источника опасности;

P_t – временная вероятность контакта человека с источником опасности;

V – вероятность потери жизни в случае контакта с источником опасности (уязвимость).

По принципу ALARP требуется, чтобы уровень риска RD был уменьшен до приемлемого значения посредством уменьшения одного из четырех множителей в формуле расчета уровня риска (P_h, P_s, P_t, V).

Степень защищенности (уязвимость) человека V – наименее эффективный параметр для понижения общего уровня риска, поэтому обычно при количественном анализе риска этот фактор принимается за единицу.

Критичность воздействия падающего обломка определяется кинетической энергией и характером поражаемого объекта. Соответствие между степенью защищенности, критической энергией и массой обломка представлено в таблице 7.

Таблица 7 – Параметры поражения объектов куском горной массы

Степень защищенности	Критическая энергия (Дж)	Вес куска породы (кг)	Высота падения куска породы (м)
Непокрытая голова	50	0,5	10
Защитная рабочая каска	200	2	10
Стекло в окне легкового автомобиля	200	2	10
Стекло в окне мобильной техники	900	10	10
Каркас легкового автомобиля	50 000	500	10
Система защиты от падающих объектов FOPS	100 000	1 000	10

Приемлемый уровень риска определяется как величина, с которой большая часть общества готова мириться для получения определённых благ и выгод в результате своей деятельности по добыче ископаемых. Полностью исключить риск потери жизни возможно только в случае отсутствия человека в зоне работы, что сделать довольно сложно, поэтому рекомендуемый годовой риск потери жизни, рассчитанный на основании исследований австралийских геомехаников, представлен в таблице 8 [82].

Таблица 8 – Приемлемый годовой риск потери жизни

Выполняемые работы	Источники опасности	Приемлемый годовой риск потери жизни
Горные работы при проектировании месторождения	Все	$1 \cdot 10^{-5}$ (0,001 %)
	Геотехнические (25 % от всех)	$0,25 \cdot 10^{-6}$ (0,00025 %)
Горные работы при разработке месторождения	Все	$1 \cdot 10^{-4}$ (0,01 %)
	Геотехнические (25 % от всех)	$0,25 \cdot 10^{-4}$ (0,0025 %)
	Потеря горного оборудования	$5 \cdot 10^{-2}$ (5 %)
Езда на автомобиле	Столкновение	$3 \cdot 10^{-4}$ (0,03 %)
Несчастный случай	Разное	$8 \cdot 10^{-4}$ (0,08 %)

В настоящий момент на российском рынке геотехнического мониторинга доступно несколько решений для отслеживания камнепадов в режиме реального времени. Одно из них — это радарная система отслеживания и оповещения о камнепадах и обвалах RockSpot, от компании IDS (рисунок 24). Система способна обнаруживать, отслеживать и оповещать о пользователе о камнепадах, размерами не более 2 м и небольших обвалах. RockSpot функционирует как дополнительный модуль, интегрируемый в общекарьерную радарную систему мониторинга деформаций, и предназначен для повышения операционной безопасности на уступах и транспортных бермах [108].



Рисунок 24 – Система отслеживания камнепадов и обвалов IDS RockSpot

Система RockSpot работает в круглосуточном режиме. Оповещения об опасности могут быть настроены для каждого сектора отдельно благодаря усовершенствованному алгоритму, который отличает движения камней от других движущихся объектов, таких как самосвалы, животные и люди. В зависимости от требований RockSpot может быть подключен к локальным сигналам тревоги, таким как сирены, автоматические шлагбаумы и другие средства оповещения. Для максимальной эффективности и оперативности вся обработка информации выполняется непосредственно на месте. Простой и компактный дизайн, а также возможность работать при любых погодных условиях позволяет устанавливать систему в любом доступном месте.

Пользователи могут получить доступ к данным RockSpot с помощью инновационной платформы GeoCloud (веб-приложение). Оптимизированный для мобильных устройств, GeoCloud предоставляет вам немедленный доступ ко всем важным

данным, относящимся к событиям. Все движения на бортах имеют географическую привязку и накладываются на карту сайта.

Для получения дополнительной информации встроенная видеокамера обеспечивает непрерывную съемку контролируемой области. Радарная карта доступна в GeoCloud вместе со всей соответствующей статистикой. GeoCloud также отправляет оповещения и уведомления пользователям по электронной почте или SMS.

Еще одним решением для активного мониторинга с системой оповещения на случай обвалов откосов и камнепадов является RGR-VELOX (рисунок 25) от австралийской компании GroundProbe [49]. Система использует электронное управление для направления луча в каждое отдельное азимутальное положение, при этом ни один механический узел не двигается. Для точной геопривязки обнаруженных деформаций, в систему интегрирован модуль ГНСС. Эта интеграция обеспечивает возможность прямого определения пространственных координат каждого наблюдаемого объекта с высокой точностью.



Рисунок 25 – Система отслеживания камнепадов и обвалов GroundProbe RDR-VELOX

В таблице 9 приведены основные эксплуатационные характеристики систем отслеживания камнепадов IDS RockSpot и GroundProbe RDR-VELOX.

Таблица 9 – Эксплуатационные характеристики систем отслеживания камнепадов

	IDS RockSpot	RDR-VELOX
Рабочая дальность (м)	2 000	5 600
Угол сканирования	горизонтальный 80°; вертикальный 40°	горизонтальный 90°; вертикальный 40°
Скорость сканирования (с)	1	0,25
Минимальная определяемая скорость (м/с)	> 1	< 0,1
Рабочая температура	от -40° до +55°	от -40° до +60°
Точность (м) (минимальный размер объекта на расстоянии 1 км)	2,5	0,3x0,3
Разрешающая способность по дальности (м)	4	1,7

1.9 Выводы по первому разделу

На основе проведенного анализа выполнена систематизация технических средств для производства деформационного мониторинга в зонах ведения открытых горных работ (таблица 10) [63], которая позволила выявить ключевые эксплуатационные и метрологические характеристики современных методов измерений.

Таблица 10 – Плюсы и минусы современных геодезических методов деформационного мониторинга

Метод мониторинга	Плюсы	Минусы
Роботизированные тахеометры	- высокая точность определения смещений земной поверхности	- высокая трудоемкость выполнения работ; - точечный метод; - зависимость от погодных условий и времени суток
ГНСС-технологии	- независимость от погодных условий и времени суток; - высокая точность определения плановых координат; - гибкость в выборе точек съемки; - короткий временной интервал выполнения наблюдений	- точечный метод; - необходимость присутствия исполнителя на объекте наблюдений; - ограничение при использовании на низких горизонтах глубоких карьеров
Аэрофотосъемка	- площадной метод	- зависимость от погодных условий и времени суток; - высокая стоимость выполнения работ; - точность
Наземное лазерное сканирование	- площадной метод; - высокая точность и детализация измерений; - высокая производительность полевых работ	- зависимость от погодных условий; - высокая стоимость проведения работ; - избыточный объем информации и высокая трудоемкость ее обработки
Наземные радарные системы	- площадной метод; - высокая точность и детализация измерений; - высокая производительность полевых работ; - независимость от погодных условий и времени суток	- высокая стоимость оборудования; - отграниченный угол обзора съемочной системы; - неоднозначность интерпретации данных при перепадах температур и сложных метеоусловий
Космическое радиолокационное зондирование	- независимость от погодных условий и времени суток; - площадной метод; - оперативность и регулярность получения данных	- точность определения смещений земной поверхности зависит от используемого метода

Отдельно проанализированы дистанционные методы наблюдения деформаций (таблица 11), опираясь на исследования Маццанти П. из Римского университета Ла Сапиенца [102]. Для сравнительного анализа была применена многокритериальная оценка, где эффективность методов ранжирована от очень низких (индекс 1) до очень высоких (индекс 5) показателей по десяти ключевым параметрам. Оценка эффективности каждого метода выражена через расчетный средний индекс.

Таблица 11 – Качественная оценка характеристик дистанционных методов определения деформаций в условиях низких температур

	Точность	Временное разрешение	Пространственное разрешение	Плотность точек	Определение геометрии деформаций	Размер области наблюдения	Оперативность	Надежность измерений	Влияние атмосферы	Экономические затраты	Средний индекс эффективности
Наземное лазерное сканирование	3	3	4	5	3	4	3	4	2	2	3,3
Наземные радарные системы (SAR)	5	5	3	4	2	4	4	4	4	2	3,7
Роботизированные тахеометры	5	4	4	2	3	3	3	4	3	3	3,4
Космическая радиолокация (InSAR)	3	1	2	3	1	5	5	3	2	2	2,7
Цифровая фотограмметрия	2	1	2	4	3	4	4	2	1	5	2,8
ГНСС-системы	4	3	1	1	5	4	5	4	4	3	3,4

Примечание.

Очень низкие показатели (1)	Низкие показатели (2)	Средние показатели (3)	Высокие показатели (4)	Очень высокие показатели (5)
-----------------------------	-----------------------	------------------------	------------------------	------------------------------

Анализ результатов систематизации и сравнительной оценки позволяет сформулировать вывод о том, что наиболее эффективной технологией для мониторинга деформаций на открытых горных работах, согласно рассчитанному среднему индексу эффективности (3,7), является технология наземного интерферометрического сканирования.

К ее ключевым особенностям относятся следующие.

1 Как активный метод дистанционного мониторинга стабильности бортов и уступов карьера, наземное интерферометрическое сканирование не нуждается во внешних источниках излучения и поэтому позволяет получать данные в любое время суток, вне зависимости от освещенности поверхности, даже в условиях полярной ночи. Радиоволны, почти не поглощаясь, свободно проходят через пыль и туман. Таким образом, радиолокационная съемка обеспечивает получение необходимой информации независимо от состояния атмосферы, практически при любых погодных условиях [54].

2 Микроволновый радиодиапазон, используемый в радиолокационном сканировании, и метод наземной интерферометрии позволяют определять смещения бортов с высокой точностью, вплоть до нескольких миллиметров.

3 Оперативность и регулярность получения данных (от 2 до 20 минут на одно сканирование в зависимости от типа радара и размера области сканирования).

Методы ГНСС-систем и роботизированных тахеометров продемонстрировали сопоставимый средний индекс эффективности (3,4), однако, как упоминалось выше, их использование в качестве основных систем непрерывного мониторинга является неудачным решением ввиду ряда ограничений, указанных в данной работе ранее.

Технологии космической радиолокационной интерферометрии (InSAR) и цифровой фотограмметрии показали наименьшие интегральные индексы (2.7 и 2.8 соответственно). Несмотря на такие неоспоримые преимущества, как площадной охват и оперативность получения данных для обширных террито-

рий, их применение для оперативного мониторинга локальных, но высокодинамичных объектов, каким является карьер, ограничено низким пространственным и временным разрешением, а также значительным влиянием атмосферных условий.

Таким образом, комплексный анализ подтверждает, что для организации непрерывного мониторинга деформаций бортов и уступов карьеров технология наземного радиолокационного интерферометрического сканирования является наиболее эффективной. Геодезические методы роботизированной тахеометрии и ГНСС, обладая высокой точностью, целесообразно применять в качестве верифицирующих и дополняющих технологий для контроля конкретных реперных точек или на участках, не охватываемых радарным сканированием.

Вместе с этим в настоящее время эффективное внедрение в существующую систему мониторинга технологии наземного интерферометрического сканирования сталкивается с трудностями, обусловленными в большей степени недостаточной проработкой нормативной базы по использованию радаров, а также отсутствием регламентированного механизма интерпретации данных сканирования радаром и алгоритма действий при срабатывании аварийных сигналов, выявлением и отбраковкой ложных срабатываний радара.

Исходя из представленных заключений, задача внедрения наземных интерферометрических радаров в существующую систему геодезического мониторинга, повышение эффективности его применения в рамках этой системы является актуальной и требует технических решений.

2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО НАЗЕМНОГО СКАНИРОВАНИЯ

2.1 Создание эффективной системы мониторинга для объектов открытых горных работ

Современная практика ведения открытых горных работ в России регламентирована комплексом нормативно-технических документов [55, 36, 32, 35, 56], в соответствии с которыми на всех карьерах в обязательном порядке осуществляется мониторинг состояния бортов, откосов и уступов. Однако внедрение инновационных технологий, к числу которых относится интерферометрическое наземное сканирование, сопряжено с рядом методологических и практических затруднений, обусловленных, в первую очередь, отсутствием апробированных методических рекомендаций и достаточного опыта их промышленного применения.

В данном разделе приведены результаты опытно-промышленной апробации и интеграции технологии наземного интерферометрического радиолокационного сканирования в существующие системы мониторинга на глубоких карьерах отечественных горнодобывающих компаний.

На рисунке 26 представлена разработанная в рамках диссертационного исследования схема проекта оптимизированной системы геодезического мониторинга с внедрением технологии наземного интерферометрического сканирования. В предложенной архитектуре наземный интерферометрический радар позиционируется как базовый метод (мониторинг первого уровня) контроля деформационных процессов в массиве горных пород, слагающих борта карьера, функционирующий в комплексе с вспомогательными визуально-инструментальными наблюдениями (мониторинг второго уровня).

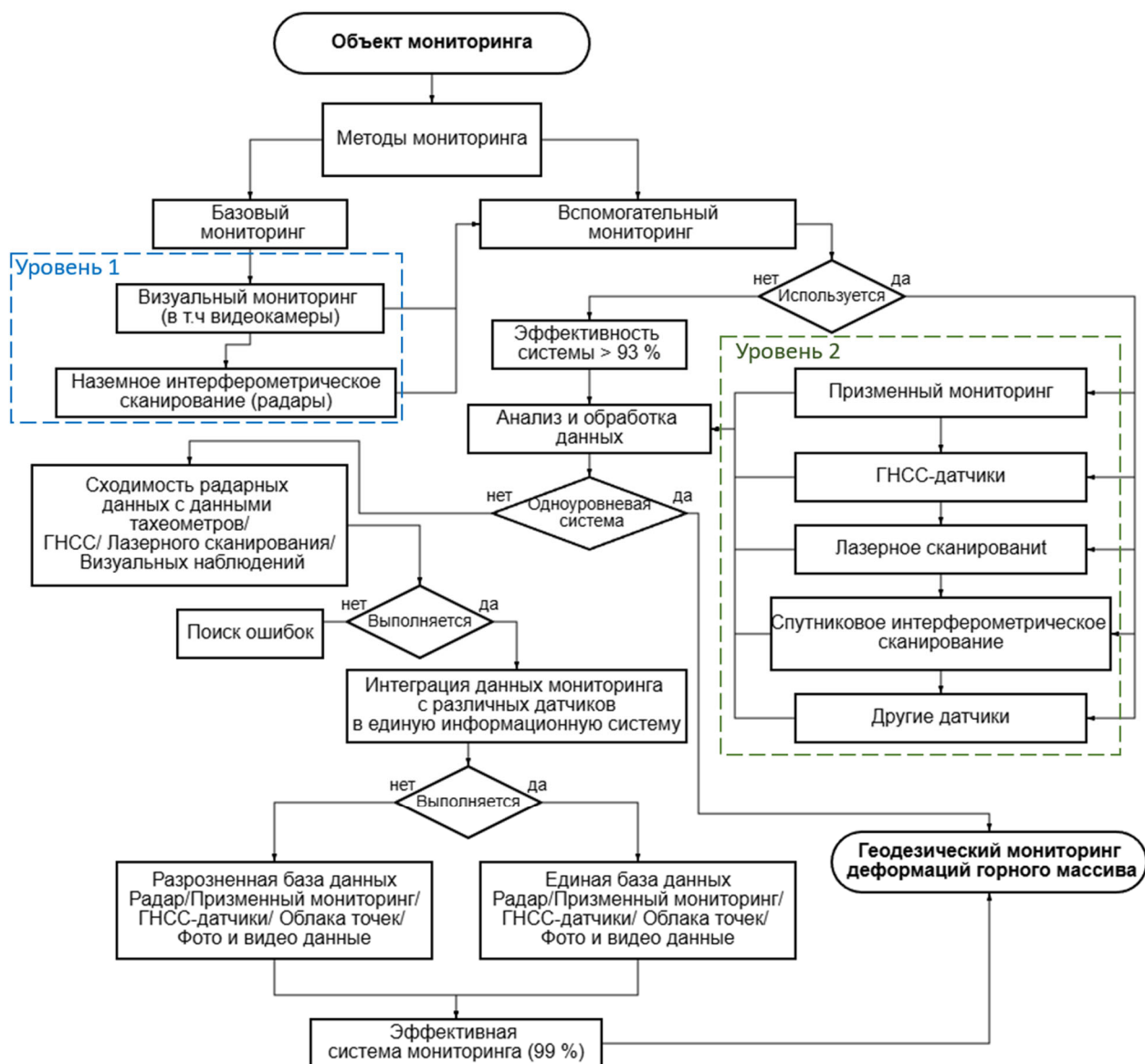


Рисунок 26 – Схема проекта эффективной системы геомеханического мониторинга с внедрением технологии наземного интерферометрического сканирования

Согласно данным таблицы 3, комбинация лишь двух указанных методов позволяет сформировать систему мониторинга, эффективность которой составляет 93 % и более. Внедрение дополнительных (вспомогательных) методов мониторинга, состав которых зависит от конкретных инженерно-геологических и горно-технических условий разрабатываемого месторождения, позволяет достичь уровня

эффективности, приближающегося к 99 %, что характеризует систему как высоконадежную.

Предложенная схема отражает структуру построения проекта системы геодезического мониторинга, методы сбора и обработки данных, а также принципы интеграции данных, полученных с разных измерительных средств в единую информационную среду.

Базовый мониторинг представляет собой основной (первый) уровень наблюдений, на котором строится вся система геодезического мониторинга. Он предназначен для обеспечения непрерывного контроля за деформационными процессами объекта мониторинга с заданной полнотой и достоверностью данных. Показатель эффективности системы при внедрении двух методов первого уровня (визуальные наблюдения и наземное интерферометрическое сканирование) обеспечивает эффективность системы с показателем более 93 %, что предполагает высокую надежность детектирования смещений горного массива.

В состав базового мониторинга входит визуальный мониторинг, включающий в себя как периодические визуальные осмотры, так и непрерывное видеонаблюдение с использованием видеокамер с режимом тепловизора. Такие наблюдения позволяют оперативно фиксировать видимые изменения состояния объекта мониторинга (трещины, осыпания, заколы) и помогают в интерпретации данных радарного мониторинга (фактическое осыпание или фиксация влаги, наледей и прочих объектов).

Также к базовому мониторингу относится наземное интерферометрическое сканирование – метод, обеспечивающий высокоточное, непрерывное измерение смещений поверхности объекта мониторинга на значительных расстояниях. Радары в предложенной схеме выступают в роли основного (базового) метода мониторинга.

Базовый мониторинг ориентирован на непрерывность, оперативность получения данных и максимальную надежность фиксации деформаций, за счет получения данных в режиме реального времени.

Вспомогательный мониторинг предназначен для повышения эффективности системы и ориентирован на углубленное изучение деформационных процессов с применением высокоточных инструментов и периодических съемок, однако с меньшей оперативностью. При совместном использовании методов мониторинга первого и второго уровней можно добиться 99-процентной эффективности системы геодезического мониторинга.

В состав вспомогательного мониторинга входят: лазерное сканирование, призмный мониторинг, различные ГНСС-датчики, лазерное сканирование, космическое интерферометрическое сканирование и другие датчики.

Важной особенностью предлагаемой схемы мониторинга является этап интеграции данных мониторинга, полученных с различных датчиков в единую информационную систему. Это обеспечивает сходимость результатов наблюдений, что повышает достоверность интерпретации деформационных процессов. В настоящий момент, в подавляющем большинстве данные мониторинга с различных датчиков хранятся отдельно, изолированно друг от друга, что создает разрозненную базу данных и накладывает ограничения на комплексный анализ данных мониторинга.

В конечном итоге, разработка и внедрение системы геодезического мониторинга в соответствии с представленной схемой, позволяет сформировать современную и высокоэффективную систему наблюдений. Ее практическая реализация позволяет фиксировать деформации горного массива с заданной надежностью, а также является основой для прогнозирования опасных геомеханических процессов.

2.1 Обоснование достаточной частоты наблюдений различных методов мониторинга

Точность и периодичность наблюдений, обеспечиваемые системой мониторинга, должны быть достаточными для получения объективных параметров деформационного процесса. Это предполагает возможность достоверной регистрации как трендовых (поступательных) смещений и деформаций горного массива, так и

знакопеременных. Объем и частота получаемых данных с датчиков должны обеспечивать заблаговременную идентификацию признаков потери устойчивости на потенциально опасных участках. Соблюдение указанных условий является необходимым для признания системы мониторинга эффективной.

Значения скоростей смещения и периодичность наблюдений устанавливается в соответствии с требованиями пункта 3.3.16 «Инструкции по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости» [17] и пункта 2.3.5 «Методических указаний по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости» [33]. Значения скоростей смещения, периодичность наблюдений и рекомендуемые методы приводятся в таблице 12.

Таблица 12 – Значения скоростей смещения, периодичность наблюдений и рекомендуемые методы

Показатели деформационного процесса	Скорость смещения, мм/сут.	Интервал времени между наблюдениями, сут.
Признаки затухающих деформаций	Менее 0,5	90-180
Признаки постоянного движения	0,5	90
	1,0	75
	2,0	40
Признаки постоянного движения	5,0	15
	9,0	8
Признаки активизации деформаций	10	4
	Более 10	1

Для расчета необходимой точности используется метод вероятно-статистического анализа измерений. Для выполнения вероятно-статистического анализа измерений уровень значимости q – такое достаточно малое значение вероятности наступления события, при котором его можно считать неслучайным. Уровень значимости выражает вероятность отклонения нулевой гипотезы, когда на самом деле

она верна. В качестве нулевой гипотезы выступает предположение об отсутствии каких-либо различий в распределении случайной величины. Таким образом, уровень значимости – вероятность признать результаты эксперимента неслучайными, тогда как они на самом деле случайны.

В современной научной практике установлена следующая градация уровней значимости:

- низкий уровень значимости равен 5 % вероятности ошибки ($q \leq 0,05$);
- достаточный уровень значимости равен 1 % вероятности ошибки ($q \leq 0,01$);
- высший уровень значимости равен 0,1 % вероятности ошибки ($q \leq 0,001$).

Вероятность принятия верного решения об отсутствии статистически значимого смещения при истинности нулевой гипотезы называется доверительной вероятностью P_q и определяется как дополнение уровня значимости до единицы [13]

$$P_q = (1 - q) . \quad (5)$$

По таблицам функции Лапласа, представляющий интеграл от плотности вероятности нормального распределения [11], для установленного значения доверительной вероятности P_q определяется соответствующее критическое значение нормированного отклонения k :

$$k = \frac{X - MO(X)}{\sigma_x} , \quad (6)$$

где X – измеренное значение;

$MO(X)$ – математическое ожидание случайной величины;

σ_x – среднее квадратическое отклонение (СКО) генеральной совокупности.

На практике используются следующие стандартные соответствия между уровнем значимости q , доверительной вероятностью P_q и коэффициентом k :

- 1) $q = 0,05$ (5,0 %) ; $P = 95,0$ % ; $k = 2,0$;
- 2) $q = 0,01$ (1,0 %) ; $P = 99,0$ % ; $k = 2,5$;
- 3) $q = 0,001$ (0,1 %) ; $P = 99,9$ % ; $k = 3,0$.

По фиксированному значению « k » рассчитывается предельное отклонение случайной величины от ее математического ожидания с заданным уровнем доверительной вероятности

$$\Delta_{\text{пред}} = |X - MO(X)|_{\text{пред}} = k * \sigma_x . \quad (7)$$

В качестве математического ожидания $MO(X)$ используется его числовая оценка, полученная из уравнивания, а стандартное отклонение σ_x заменяют значением среднего квадратического отклонения (СКО) отдельного измерения – m . Для двойных измерений (например, высотных отметок реперов H) СКО разности, т. е. линейной функции независимых случайных величин, вычисляется по формуле:

$$m_{\Delta} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} = \sqrt{2} \cdot m . \quad (8)$$

Предельная ошибка разности двойных равноточных измерений вычисляется по формуле:

$$m_{\text{пред}} = \sqrt{2} \cdot k \cdot M . \quad (9)$$

Если разница между двумя измерениями превышает установленный допуск, то с вероятностью P_q можно утверждать, что результаты измерения конкретной отметки не подчиняются нормальному закону распределения случайных ошибок измерений, так как получены под воздействием каких-либо внешних факторов.

В принятых условиях вероятностно-статистического анализа измерений, утверждать о присутствии или, наоборот, об отсутствии какого-либо движения наблюдаемого репера невозможно, если расхождение между двумя циклами наблюдений не превышает предельную величину для разности двойных измерений.

В тех случаях, когда зафиксированное смещение превышает установленный критерий, требуется проведение анализа для идентификации генезиса данного явления. К основным внешним причинам изменения результатов измерений относятся:

- грубые ошибки измерений;
- собственная нестабильность наблюдаемого пункта;
- общее смещение участка земной поверхности.

Грубые ошибки измерений и собственная нестабильность пункта проявляются в сети индивидуально в виде точечных аномалий. Характеристика ошибок на таких пунктах контрастирует с фоновыми значениями на соседних пунктах наблюдений. С математической точки зрения аппроксимация ряда наблюдений в этом случае становится неоднородной, анализируемые величины – поправки к измерениям и градиенты приобретают экстремальные значения. Общее смещение проявляется в виде когерентного, пространственно-согласованного изменения положений группы соседних реперов, что позволяет выделить область деформации и проанализировать ее кинематику

Расчет требований к точности определений координат и высот реперов для определения скорости смещения пункта наблюдений выполняется по формуле [8]:

$$M \leq \frac{\Delta t}{k\sqrt{2}} V_{lim}, \quad (10)$$

где M – точность определения деформации, мм;

Δt – интервал времени между циклами наблюдений, сут;

V_{lim} – пороговое значение скорости смещения, необходимое для классификации наблюдаемого явления, мм;

k – коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности (нормированное отклонение).

Коэффициент k устанавливается в соответствии с принятым уровнем статистической значимости измерений. В рамках данного исследования принят достаточный уровень статистической значимости, при котором вероятность появления ошибки должна быть менее 1 %, что соответствует доверительной вероятности $P = 99$ %, нормированное значение случайной величины k в этом случае равно 2,5.

Для большинства скальных карьеров, по результатам исследований деформаций было выявлено, что фоновая скорость, не влияющая на стабильность откоса,

составляет 0,1 мм/ч или 2,4 мм/сут, тогда как 95 % деформаций развились, когда скорость сдвижения горного массива составляла от 5 до 15 мм/ч, что составляет от 120 мм/сут до 360 мм/сут.

Периодичность наблюдений зависит от скорости смещений реперов, и выбирается по таблице 13 [33], разработанной ВНИМИ. Часть значений, приведенных в таблице, получена методом аналитической интерполяции, и носит оценочный характер, однако удовлетворяют требованиям для расчета периодичности наблюдений. Согласно этим данным, максимальный интервал между наблюдениями для карьеров не должен превышать 0,5 суток или 12 часов.

Исходя из этих данных примем пороговое значение скорости смещения, необходимое для классификации наблюдаемого явления равным 120 мм/сутки, хоть и при подобных скоростях смещения скального массива деформация развивается гораздо стремительней, в пределах нескольких часов. К тому же скорость развития деформации протекает не линейно, а с ускорениями и замедлениями, по параболаобразному графику [76].

Таблица 13 – Требования к периодичности наблюдений в зависимости от скоростей смещений прибортового массива

	Скорость смещения, мм/сут	Периодичность наблюдений, сутки
Данные ВНИМИ	0,1	730
	0,5	150
	1,0	75
	2,0	40
	5,0	15
	10,0	8
Интерполированные	20,0	4
	40,0	2
	80,0	1
	120,0	0,5

На основании технических характеристик применяемого для деформационного мониторинга оборудования была определена возможная периодичность наблюдений, при которой достигается необходимая точность определения деформаций разными видами оборудования. Для этого формула расчета необходимой точности определения деформаций (формула (10)) была преобразована в формулу расчета периодичности наблюдений относительно интервала времени Δt :

$$\Delta t \leq \frac{M \cdot k \sqrt{2}}{V_{lim}}. \quad (11)$$

Принято условие, что требуемая точность определения деформации M эквивалентна паспортной точности измерений m . Паспортная точность различного оборудования приведена в таблице 14.

Таблица 14 – Паспортная точность различного оборудования, применяемого в мониторинге на ОГР

№	Тип оборудования	Паспортная точность измерения (мм)	Примечание
1	ГНСС-приемник Leica GMX902	В плане – $(5+0,5 \cdot D)$ По высоте – $(10+0,5 \cdot D)$	
2	Роботизированный тахеометр Leica Nova TM50	$(0,6 + 1 \cdot D)$ мм	Измерения расстояния на отражатель
3	Радар Reutech MSR300	0,2	$D < 2\,500$ м
4	Радар GroundProbe SSR-FX	0,1	$D < 2\,000$ м

Расчеты периодичности наблюдений произведены по формуле (11) и систематизированы в таблице 15.

Таблица 15 – Расчеты периодичности наблюдений различного оборудования

Условия для расчетов	Показатели
Исходные данные для расчета: – пороговое значение скорости смещения пункта V_{lim} (мм/сут); – расстояние до определяемой деформации D , км; – нормированное значение случайной величины k	120 1 2,5
Варианты решения задачи	
ГНСС-приемник Leica GMX902 – реальная точность измерений В плане $m_{xy} = (5 + 0,5 \cdot D)$ мм По высоте $m_z = (10 + 0,5 \cdot D)$ мм Количество приемов измерений n – периодичность наблюдений сутки; – периодичность наблюдений часы	5,5 10,5 1 0,351 8,4
Роботизированный тахеометр Leica Nova TM50 – реальная точность измерений при $D = 1$ км; – количество приемов измерений n ; – периодичность наблюдений сутки; – часы	1,6 1 0,047 1,1
Радар Reutech MSR300 при $D < 2,5$ км – реальная точность измерений $n=1$, мм; – количество приемов измерений n ; – периодичность наблюдений сутки; – минуты	0,2 1 0,006 8,5
Радар GroundProbe SSR-FX при $D < 2\ 000$ м – реальная точность измерений $n=1$, мм; – количество приемов измерений n ; – периодичность наблюдений сутки; – минуты	0,1 1 0,0071 4,2

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

Для надежной ($P = 99\%$) интерпретации данных при скорости развития деформации 120 мм/сутки, требуемая периодичность наблюдений составляет:

- для ГНСС-оборудования – не реже 8,4 часа;
- для роботизированного тахеометра – не реже 1,1 часа;
- для радарных систем – от 4,2 до 8,5 минут.

В зимний период и во время низких температур получение данных с роботизированных тахеометров каждые 1,1 часа технически неосуществимо, что было эмпирически обосновано в 1.5. Данные ГНСС-систем, в свою очередь, обеспечивают

покрытие лишь прибортового массива карьера и непригодны для детального мониторинга локальных участков внутри карьера.

Таким образом, единственной технологией, удовлетворяющей критерию достаточной частоты наблюдений, является метод наземного интерферометрического сканирования, обеспечивающий возможность получения данных с интервалом в несколько минут.

Неоспоримым преимуществом радарного мониторинга в этом случае является сканирование области без использования дополнительных датчиков и отражателей, как в случае с ГНСС-системами и электронными тахеометрами.

При обнаружении потенциально опасного участка при подобных скоростях смещения горного массива, деформация способна развиться в пределах нескольких часов, что делает физически невозможной оперативную установку датчиков и отражателей ГНСС-систем и тахеометров.

2.2 Внедрение технологии наземного интерферометрического сканирования в традиционную систему мониторинга на открытых горных работах

Исторически, при первоначальном внедрении технологии наземного интерферометрического сканирования в практику зарубежных горнодобывающих компаний, ее применение было сфокусировано на локальном мониторинге уже выявленных опасных участков и зон потенциального развития деформаций, что было обусловлено, в первую очередь, высокой стоимостью оборудования. В отличие от этого подхода, в российской практике широкое распространение радарных систем произошло на более позднем этапе, когда технология была достаточно отработана, а ее стоимость стала более доступна.

Данное обстоятельство позволило изначально закладывать в проект системы мониторинга стратегию площадного непрерывного контроля, при которой радары размещаются по периметру карьера для круглосуточного наблюдения за всеми бор-

тами в целом. Для глубоких и сверхглубоких карьеров, где вся поверхность бортового массива может рассматриваться как потенциально нестабильная, реализация такой стратегии оказывает существенное положительное влияние на уровень промышленной безопасности.

Эффективность радарного мониторинга напрямую зависит от правильного выбора мест установки оборудования [80].

Несмотря на ограничения, накладываемые активной разработкой карьеров, для обеспечения высокой достоверности данных сканирования необходимо руководствоваться следующими принципами размещения радаров.

1 Обеспечение беспрепятственной радиовидимости. Место установки должно гарантировать полный и беспрепятственный обзор контролируемого борта на всей его протяженности.

2 Оптимизация геометрии сканирования. Рабочая позиция должна быть выбрана таким образом, чтобы луч радара был максимально близок к перпендикуляру к поверхности склона. Следует избегать углов, которые более чем на 40 градусов отклоняются от перпендикуляра к склону.

3 Обеспечение стабильности платформы. Рабочая площадка должна быть достаточно прочной, ровной и устойчивой, чтобы исключить смещения самого радара в процессе сканирования.

4 Фиксация оборудования и обеспечение безопасности. Радар устанавливается неподвижно и ограждается от случайного наезда на него карьерной техники и оборудования. В целях безопасности, по краю уступа необходимо отсыпать предохранительная бровку.

В противном случае существует вероятность низкой достоверности данных сканирования, что в совокупности с другими факторами двойственности интерпретации результатов сканирования может привести к ошибочным выводам о геомеханическом состоянии массива и, как следствие, принятию неверных управленческих решений.

Эффективность определения деформационных процессов методом интерферометрического сканирования сильно зависит от пространственного расположения радарной системы относительно контролируемого склона и предполагаемого вектора смещения. Радар, как уже упоминалось ранее, измеряет проекцию полного вектора смещения на свою линию визирования. Следовательно, при установке радара перпендикулярно направлению движения массива регистрируется наиболее приближенная к истинному значению величина вектора деформации. С увеличением угла между направлением на объект и вектором смещения чувствительность системы падает, что приводит к недооценке реальной скорости и величины деформации.

Расположение радара относительно склона и направления деформации напрямую влияет на скорость и количество зарегистрированных деформаций. Если радар установлен перпендикулярно наклону и направлению движения деформации, то он способен зарегистрировать 100 % общего вектора деформации. Однако с увеличением угла сканирования радар будет обнаруживать меньшее количество деформаций.

Пример, когда по данным сканирования радара было неверно интерпретировано сдвигание горного массива из-за неправильной установки радара, произошел на карьере Сэвидж-Ривер в Тасмании [100]. В результате ошибочно выбранной стабильной зоны и расположения радара под острым углом к области сканирования, заметить сдвигание в области вывала удалось лишь за 7 минут до развития деформации (рисунок 27). По результатам повторного ретроспективного анализа данных сканирования специалистами компании Reutech Mining, было выявлено, что при наличии в зоне обрушения установленных оповещений опасности и определении другого стабильного региона радар смог бы оповестить о смещении за 56 минут до вывала. Отсюда следует, что все участки борта карьера следует считать потенциально неустойчивыми.

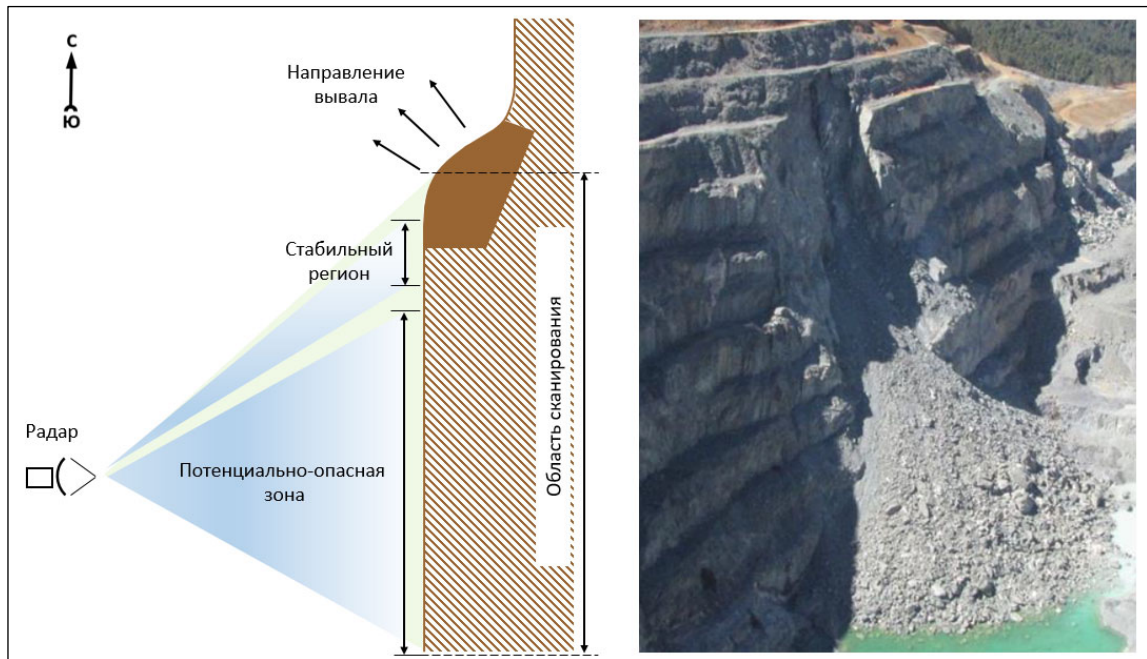


Рисунок 27 – Схема установки радара и зона обрушения на карьере Сэвидж-Ривер в Тасмании, 2010 г.

Важно отметить, что даже интервал в 56 минут до вывала является недостаточным для принятия комплексных мер по эвакуации техники и персонала. Столь короткое время прогноза было обусловлено двумя ключевыми факторами.

- 1 Охват радаром лишь периферийной части зоны будущего обрушения.
- 2 Значительное снижение чувствительности измерений из-за сканирования под большим углом к направлению смещения.

Стратегия предотвращения подобных ситуаций включает использование нескольких радаров, которые будут располагаться в более подходящем месте относительно сканируемого участка борта карьера либо установку радаров в такое положение, которое позволяет находится антенне радара максимально перпендикулярно к ожидаемому сдвигу.

Наземный интерферометрический радар способен рассчитать смещение только вдоль направления линии визирования. Сдвиги, перпендикулярные линии визирования, будут иметь нулевое смещение, и не могут быть зарегистрированы радаром. Таким образом для как можно более большого количества регистраций сдвижения горного массива наличие в системе мониторинга одного радара является недостаточным.

Пример возможной организации расположения наземных интерферометрических радаров на карьере круглой формы представлен на рисунке 28.

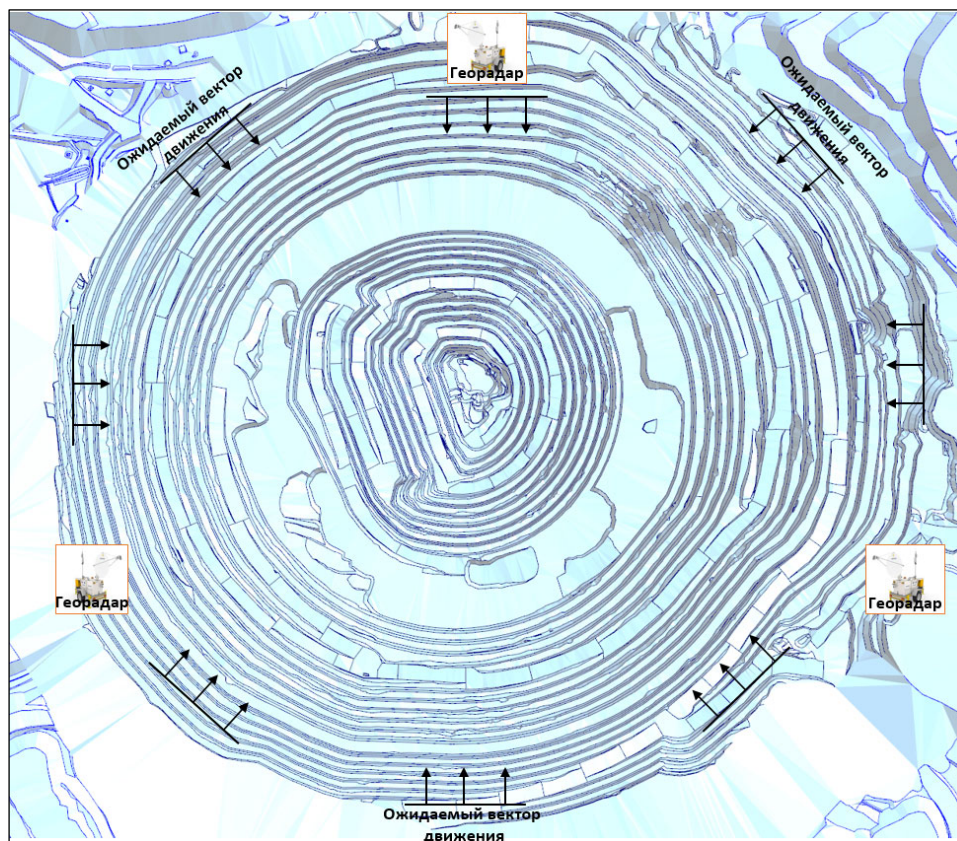


Рисунок 28 – Схема расположения радаров на карьере круглой формы

Представленная на рисунке 29 схема демонстрирует конфигурацию, обеспечивающую максимально эффективное радиолокационное покрытие бортов для карьеров круглой (или приближенной к круглой) формы. Более детальное описание данной компоновки будет приведено в последующих разделах настоящей главы.

Проектирование системы мониторинга с применением радаров для карьеров со сложной, вытянутой или изогнутой формой требует учета дополнительных факторов. Типовая схема для таких карьеров может иметь вид, показанный на рисунке 29.

В данной конфигурации возникает характерная проблема: при наблюдении протяженного борта с противоположных сторон короткие фланговые борта оказываются ориентированными таким образом, что вектор ожидаемого смещения становится близким к ортогональному по отношению к линии визирования радаров. В

результате, чувствительность системы к деформациям на этих участках резко снижается, что не позволяет достоверно фиксировать происходящие сдвигения.

Для исключения таких случаев предлагается использовать дополнительные методы мониторинга, например это могут быть роботизированные тахеометры, которые не имеют указанного ограничения по направлению измерений. Для мониторинга локальных зон с заранее установленным повышенным уровнем риска целесообразно использовать мобильные радары, такие как IDS Hydra и др. Их ключевым преимуществом является возможность оперативного позиционирования на штативе для обеспечения близкого к перпендикулярному направления сканирования. Основным эксплуатационным ограничением данного класса оборудования является меньшая в несколько раз, по сравнению со стационарными аналогами, дальность действия, составляющая порядка 600–1 000 м.



Рисунок 29 – Схема расположения радаров на карьере сложной формы

Некоторые модели радаров (к ним относятся Reutech MSR и IDS Hydra X) нуждаются в геопространственной привязке, которая выполняется с использованием геодезических инструментов, тахеометров или ГНСС-приемников (рисунок 30). Другие модели радаров (например, радары компании GroundProbe) позволяют осуществлять геопространственную привязку с применением встроенных в программный комплекс методами, путем совмещения полученного радиолокационного изображения с заранее загруженной цифровой моделью рельефа (ЦМР) или цифровой моделью карьера (ЦМК). Целью геопространственной привязки является определение положения и ориентации радара в локальной системе координат (системе координат предприятия).

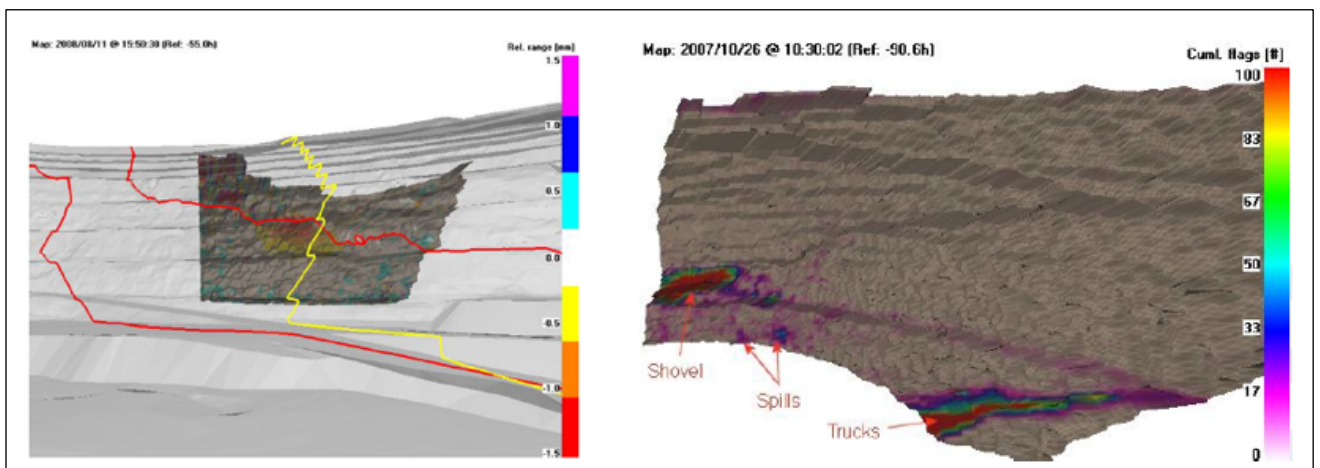


Рисунок 30 – Привязка радара Reutech MSR300 в карьере

Использование геопространственной привязки радара позволяет накладывать интерферограмму сканирования на актуальный план горных работ, а также визуализировать дополнительную геологическую и геотехническую информацию (зоны разломов, тектонические нарушения, исторические области деформаций). Комплексная визуализация значительно повышает наглядность и интерпретационную ценность результатов мониторинга. На рисунке 31, *а* изображена интерферограмма

сканирования радара Reutech MSR300 с визуализацией находящихся в анализируемой зоне геологических нарушений, в данном случае разломов (красные и желтые линии).

Отдельной важной задачей является фильтрация помех, вызванных движением технологического транспорта и горной техники. Алгоритмы детектирования такой активности позволяют идентифицировать и отбраковывать заведомо ложные сигналы смещения, не связанные с деформациями горного массива (рисунок 31, б). Это существенно повышает достоверность данных и снижает количество ложных тревог, обеспечивая более точную интерпретацию деформационных процессов.



а)

б)

Рисунок 31 – Вид синтетической карты с указанием геологических данных

Радарные системы компании GroundProbe обладают функционалом, который позволяет осуществлять первичную интерпретацию данных сканирования путем их проекционного наложения на фотографическое изображение контролируемого участка. Специализированное программное обеспечение SSR-Viewer отображает данные о деформациях в перспективе, максимально приближенной к естественному визуальному восприятию борта карьера (рисунок 32). Данный подход обеспечивает оперативную идентификацию деформирующихся участков без необходимости предварительного трехмерного моделирования или выполнения трудоемкой

процедуры геодезической привязки радара к опорной геодезической сети горно-рудного предприятия.

Несмотря на вышеуказанное преимущество, отказ от геопространственной привязки может существенно ограничить дальнейший анализ. Наличие точных координат является критически важным для корректного экспорта результатов сканирования в сторонние программные среды (такие как AutoCAD, Micromine, Surpac и др.) с целью проведения углубленного анализа, точного определения положения деформационных процессов в единой системе координат предприятия, а также сопоставления радарных данных с другой геотехнической и геологической информацией.

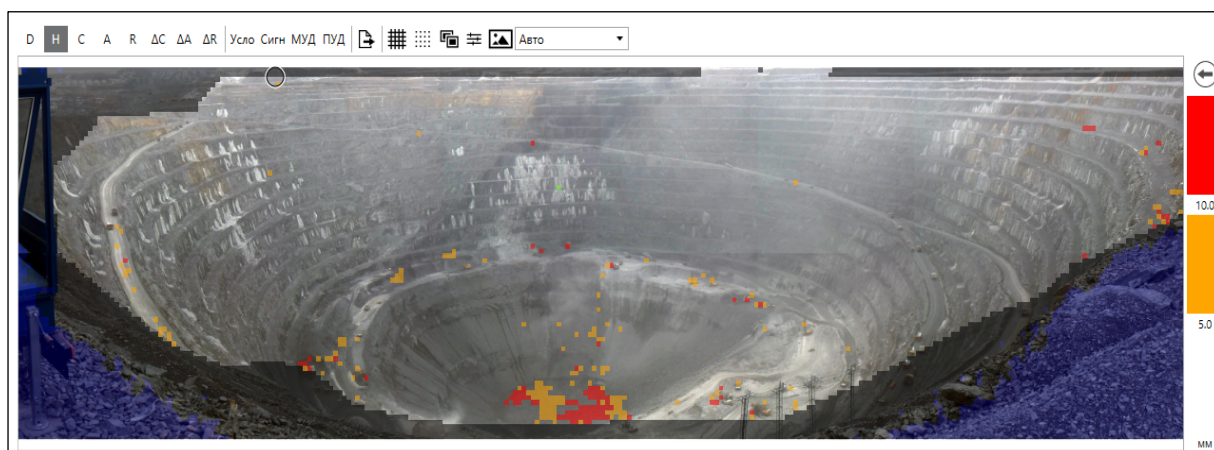


Рисунок 32 – Пример отображения результатов сканирования радара GroundProbe SSR-XT

Сравнительные характеристики радарных систем различных производителей, включающие угловые параметры сканирования, приведены в таблице 16. Ключевым параметром, определяющим зону сканирования с одной позиции установки, являются горизонтальный и вертикальный углы сканирования. Среди рассмотренных моделей минимальное значение данного параметра составляет 190 градусов (Reutech MSR300). В то же время, такие радары как GroundProbe SSR-OMNI и IDS IBIS-ArcSAR, обладают возможностью кругового обзора, обеспечивая сканирование в полном азимутальном диапазоне 360 градусов [52, 51]. Это позволяет осуществлять мониторинг всей периферийной зоны карьера с единой стационарной

позиции, что существенно превышает эффективность системы при контроле объектов с круговой структурой.

Таблица 16 – Размер угловых характеристик сканирования интерферометрических радаров

Наименование радара	Горизонтальная плоскость (град)	Вертикальная плоскость (град)
Reutech MSR300	от -100 до +90	от -32 до +45
GroundProbe SSR-XT	от -135 до +135	от -45 до +55
GroundProbe SSR-OMNI	360	60
IDS IBIS-ArcSAR	360	112

На рисунке 33 представлена схема размещения наземных интерферометрических радаров, разработанная для карьеров, имеющих круглую или близкую к кругу форму.

Для таких карьеров оптимальной является конфигурация расположения с использованием трех радаров, которые находятся на противоположных бортах карьера с угловым шагом между ними примерно 120 градусов. Подобная схема размещения представляется наиболее результативной, поскольку при функционировании всей системы каждый радар осуществляет мониторинг сектора в 240 градусов по периметру карьера. При этом в пределах 120-градусной зоны, направление вектора смещения горной массы является близким к нормали относительно оси радарного луча, что является ключевым условием для обеспечения высокой точности измерений линейных смещений по линии визирования. Стрелками указано предполагаемое направление смещения горной массы при развитии деформаций.

Кроме того, 240-градусный сектор обзора каждого радара обеспечивает перекрытие зон мониторинга и создает систему резервирования. Это позволяет осуществлять непрерывный геотехнический мониторинг состояния бортов карьера даже в случае выхода из строя одного из радаров (например, при проведении планового технического обслуживания, ремонтных работах или временном отгоне в связи с проведением взрывных работ на карьере).

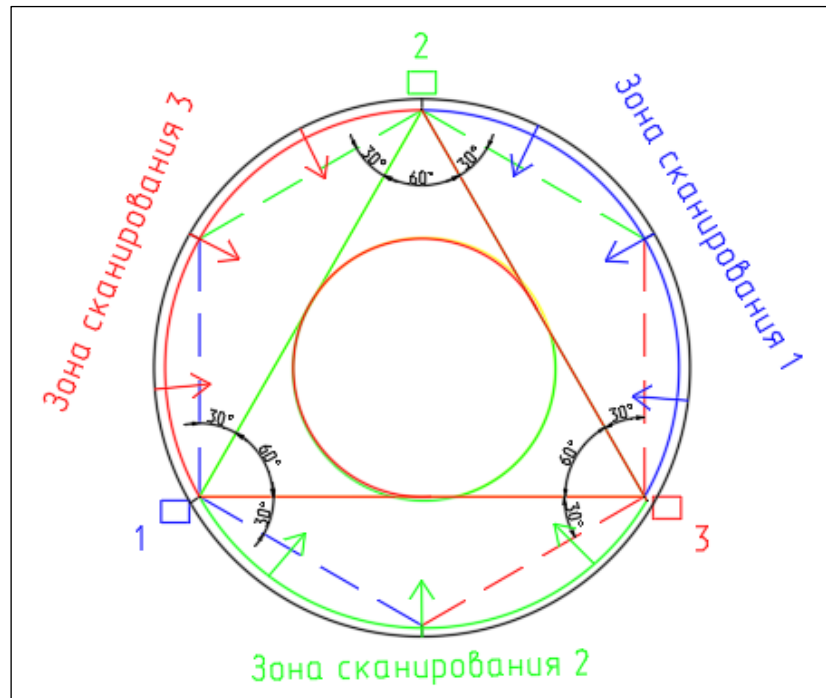


Рисунок 33 – Схема расположения радаров на карьере

При ведении горных работ на глубоких (свыше 500 м) и сверхглубоких (свыше 800 м) горизонтах, размещение радаров на верхних горизонтах борта карьера может приводить к возникновению зон неконтролируемых деформаций. Это связано с тем, что нижние уступы, находящиеся в непосредственной близости от рабочей бермы, могут не попадать в зону видимости радара, вследствие ограниченного угла сканирования. Между тем, мониторинг данных участков является критически важным, поскольку именно здесь фиксируется наибольшая доля локальных деформационных процессов.

Для решения указанной проблемы целесообразно применять стратегию размещения радарного комплекса на промежуточных горизонтах карьера. Это позволяет оптимизировать геометрию обзора и обеспечить сканирование наиболее ответственных нижних уступов.

На рисунке 34, а представлен пример размещения радара на отметке гор. +750 м. При таком расположении радара зона сканирования противоположного борта составляет 26 градусов, что приводит к образованию «слепой» зоны высотой 96 м, которая остается без мониторинга.

При альтернативном расположении (рисунок 34, б) радар расположен ниже, на отметке гор. +430 м, что позволяет обеспечить полный обзор всего противоположного борта карьера.

Таким образом, расположение радара, представленное на рисунке 34, б, является наиболее оптимальным с точки зрения минимизации неконтролируемых зон.

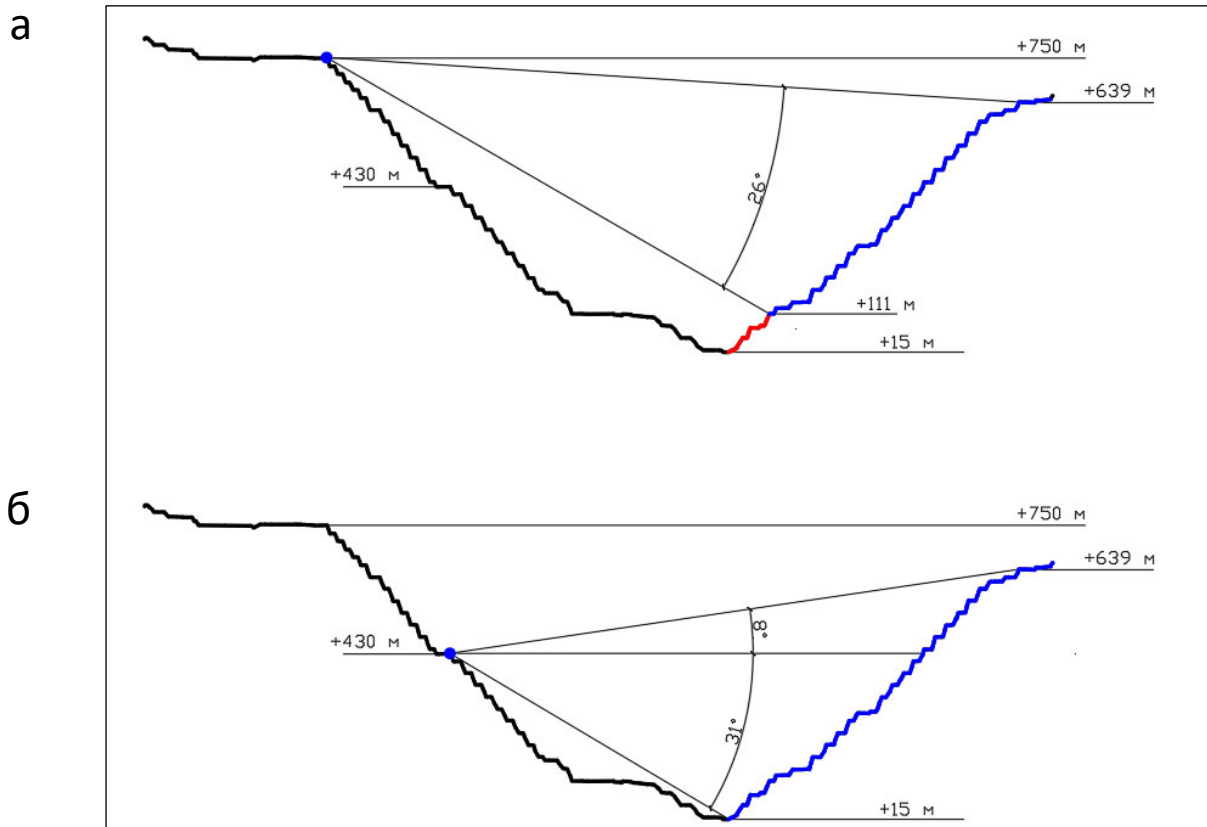


Рисунок 34 – Пример расположения радара и зоны его сканирования на глубоком карьере

Следует также учитывать, что производители радаров рекомендуют выбирать площадку для установки радара с таким учетом, чтобы свести к минимуму его последующие перемещения. Данное требование обусловлено принципом работы радара, основанном на накоплении ретроспективной базы данных измерений смещений. Каждое последующее сканирование позволяет производить расчет накопленных смещений и средней скорости деформации путем сравнения с предыдущими

измерениями. Несмотря на это, периодическая остановка мониторинга и перемещение станции являются неизбежными операциями в связи с необходимостью проведения метрологической поверки, планового технического обслуживания и обеспечения безопасного расположения радара при взрывных работах.

2.3 Выводы по второму разделу

В рамках данного раздела выполнено теоретическое обоснование периодичности наблюдений такими методами, как роботизированный тахеометр, ГНСС и наземное интерферометрическое сканирование.

Проведенные расчеты наглядно демонстрируют, что единственным методом, удовлетворяющим критерию необходимой достаточности количества данных, является метод наземного интерферометрического сканирования. В настоящее время только данная технология обеспечивает круглосуточный и круглогодичный сбор информации о состоянии массива с интервалом от 4,2 до 8,5 минут, сохраняя работоспособность в условиях продолжительного зимнего периода и экстремально низких температур.

Мониторинг с использованием роботизированных тахеометров не соответствует установленным требованиям, поскольку не позволяет достичь расчетной периодичности измерений (интервал в 1,1 часа) в условиях низкотемпературного режима, что обусловлено ограниченной видимостью и обмерзанием отражательных призм.

Метод ГНСС-наблюдений, даже при условии сбора достаточного массива данных с датчиков, обеспечивает мониторинг исключительно прибортового массива и не предоставляет возможности для детального контроля локализованных участков деформирующихся откосов и бортов.

Таким образом, современную и эффективную систему для мониторинга бортов глубоких и сверхглубоких карьеров невозможно представить без интеграции наземных интерферометрических радаров в качестве базового метода наблюдений.

3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ СКАНИРОВАНИЯ НАЗЕМНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ РАДАРОВ ПРИ МОНИТОРИНГЕ НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ

3.1 Определение неоднозначностей и ложных срабатываний при интерпретации интерферограмм сканирования

При интерпретации результатов интерферометрического сканирования одной из частых проблем, с которой сталкиваются пользователи, являются «шумы». Теоретически, принцип действия и конструкция радара позволяют измерять смещения массива с субмиллиметровой точностью, однако необходимо учитывать, что по сути измерения происходят с помощью отражающихся электромагнитных волн, на качество которых оказывают влияние внешние факторы [81].

Среди этих факторов можно выделить: перпендикулярность радара по отношению к сканируемой области, тип поверхности (обнаженные породы дают наилучшее качество данных, в то время как растительность или снежный покров «зашумляют» сигнал), а также метеорологические условия (дождь, снег и т. д.) Погодные явления являются главным источником «шумов» и сильнее всего ухудшают достоверность данных. Для того чтобы минимизировать влияния атмосферных помех, используются специализированные алгоритмы атмосферной коррекции, которые в определенной степени позволяют компенсировать влияние этого фактора.

Уменьшение «шумов» позволяет повысить достоверность исходных данных, увеличить точность проводимого анализа и уменьшить количество ложных сигналов о происходящих смещениях.

После идентификации области потенциальной опасности на радарной интерферограмме, по каким-либо признакам, ключевой задачей становится ее анализ. Основным инструментом анализа являются графики смещений, скоростей смещений, ускорений и других показателей (таких как когерентность, качество отраженного сигнала и др.), предоставляемых для анализа ПО радара.

В ПО всех рассмотренных в данной работе радаров предусмотрена функция настройки карт опасности, которые в автоматическом режиме оценивают параметры смещения на контролируемом участке и сигнализируют, если их величины превышают установленные пороговые значения.

При анализе и сравнении систем оповещения в различных радарх, и как следствие в разных программных комплексах, следует обращать внимание на два ключевых аспекта, первым из которых является точность, с которой пользователь может задавать карты опасности: на какие величины можно произвести настройку (смещения, скорости смещений, ускорения, обнаружение пиковых значений и т. д.), как задаются области, пороги, за какие интервалы можно задать усреднение данных, каким образом оно происходит и т. д.

Ко второму аспекту относится надежность системы оповещений и наличие ложных срабатываний. Последние напрямую связаны с уровнем шумов в данных радара (чем больше в этих данных «шумов», которые программа интерпретирует как смещение, тем больше количество ложных срабатываний). Тем не менее этот фактор следует рассматривать отдельно, так как помимо «шумов» на ложные срабатывания оказывают влияние параметры усреднения и алгоритмы обработки данных.

Первоначально, интерферометрические радары разрабатывались и тестировались в лабораторных условиях, с последующей апробацией на небольших карьерах, с максимальным расстоянием до борта, не превышающим 400 м. Однако с развитием технологии, рабочая дальность современных радаров уже достигает 5 км, что позволяет применять их для мониторинга на крупнейших карьерах мира. В указанных масштабах атмосферная изменчивость становится столь выраженной, что внутри одного карьера можно выделить несколько зон с собственным микроклиматом. Данный атмосферный градиент вносит существенные погрешности в измерения и способен серьезно влиять на результаты сканирования [92].

На рисунке 35 представлена схема, иллюстрирующая потенциальное влияние пространственной неоднородности атмосферы на результаты сканирования наземного интерферометрического радара.

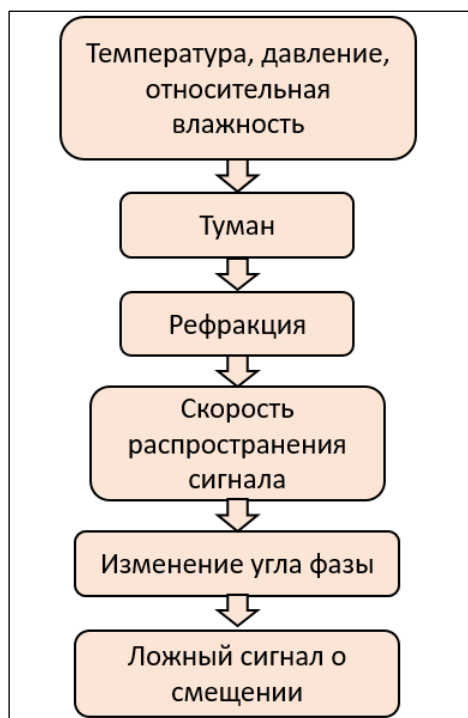


Рисунок 35 – Схема влияния атмосферной изменчивости на результаты интерферометрического сканирования

Изменение температуры, давления и относительной влажности воздуха способствует появлению тумана, который в свою очередь вызывает преломление сигнала и приводит к эффекту, называемому рефракцией. Скорость распространения сигнала различных атмосферных кластерах влияет на изменение угла фазы, что в свою очередь приводит к ложным сигналам о смещении горного массива.

Для снижения уровня зашумленности производителями радаров были разработаны и внедрены несколько методик. Практически все они основаны на программном внесении поправок в алгоритмы вычислений радаров. К таким методам относятся: установка метеостанции вблизи радара для коррекции результатов сканирования с учетом рефракции, а также алгоритм отслеживания статистического

изменения пикселей для классификации областей, подходящих для атмосферной коррекции [107].

Единственным способом, позволяющим пользователю самостоятельно влиять на минимизацию атмосферной рефракции, является создание так называемых «условных зон устойчивости». Данный метод предполагает задание набора реперных точек или областей в зоне сканирования радара, которые алгоритмом радара заведомо будут считаться стабильными. Любое зафиксированное в этих зонах смещение расценивается как результат влияния атмосферной рефракции и корректируется.

При работе с наземными интерферометрическими радарными данными и интерпретации данных интерферограмм сканирования, как и в любой другой работе, присутствует человеческий фактор. Решения, которые принимает специалист, занимающийся интерпретацией данных радарного мониторинга, могут прямо влиять на эффективность системы раннего предупреждения потенциально возможных деформаций. Инструментом минимизации субъективных ошибок служит накопленный опыт долгосрочных наблюдений за деформационными процессами, их системный анализ и формирование ретроспективной базы данных о зафиксированных деформациях, для каждого конкретного месторождения, что позволяет проводить верификацию текущих данных на основе установленных критериев опасности.

На рисунке 36 представлена разработанная автором в рамках данного исследования алгоритмическая схема интерпретации данных интерферометрического сканирования [1, 76].

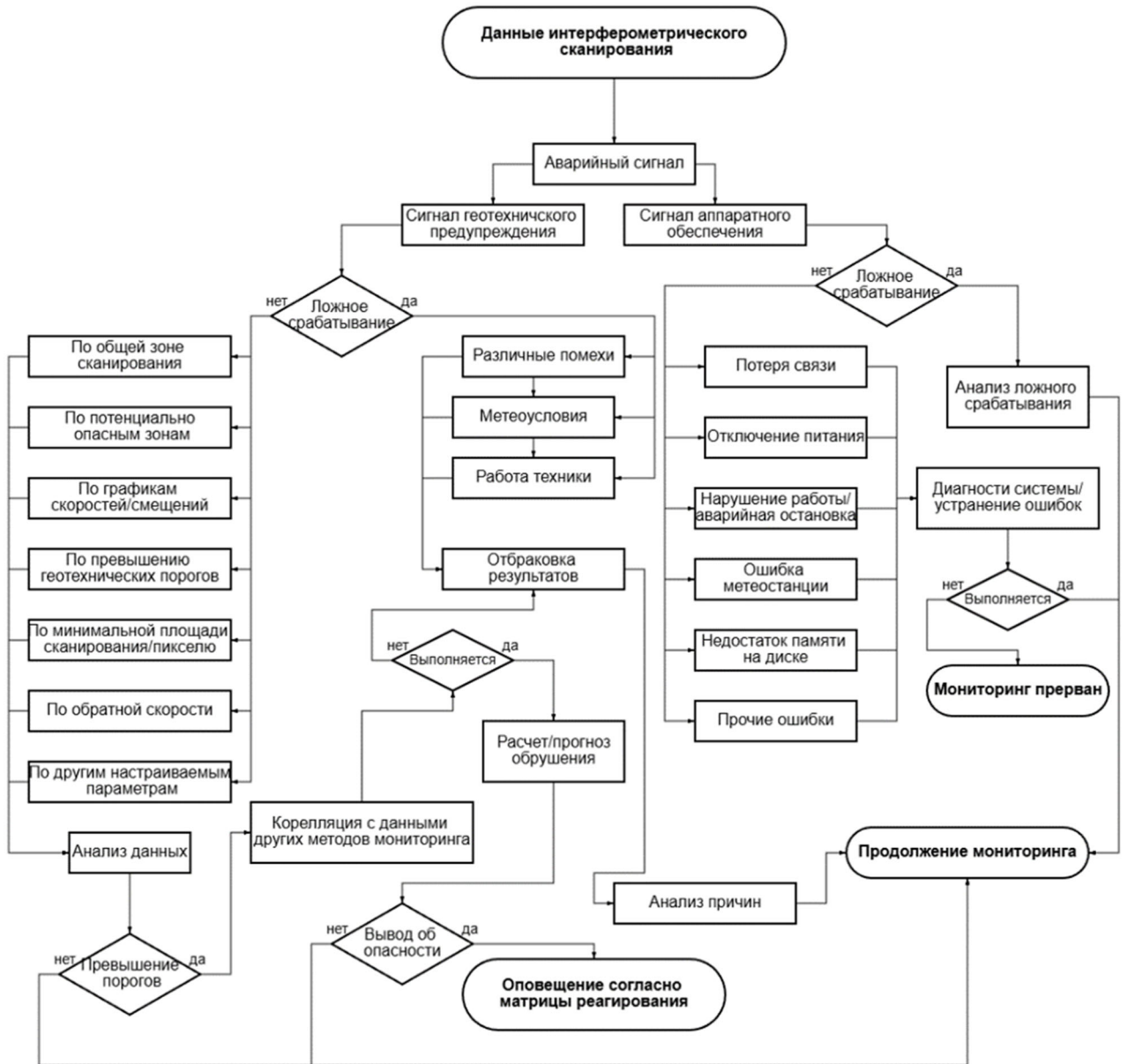


Рисунок 36 – Алгоритмическая схема обработки данных интерферометрического сканирования

При интерпретации данных радарного сканирования, представленных в виде интерферограмм, и выявления аварийных сигналов важнейшей задачей является их анализ и верная интерпретация.

Срабатывание аварийной сигнализации радарной системы может быть вызвано двумя принципиально различными факторами: неисправностями аппаратного обеспечения или геотехническим предупреждением. Предупреждение о приостановке процесса сканирования возникает в случаях проблем со связью или ее

потерей, при отключении питания, нарушении работы или аварийной остановке, недостатке места на диске для записи данных, ошибках в работе метеостанции и других ошибках. Если данный сигнал верифицирован как достоверный, необходимо произвести диагностику системы радара, устранить выявленные ошибки в максимально короткие сроки, после чего, при выполнении условия устранения ошибки, мониторинг продолжают.

При получении сигнала геотехнического предупреждения необходимо выявить его характер: истинное смещение происходит в наблюдаемой зоне или это ложное срабатывание. Ложные сигналы, возникающие вследствие влияния погодных условий, работающей техники и оборудования, электромагнитных и других помехах, подлежат исключению из дальнейшей обработки. В случае подтверждения достоверного срабатывания, которое инициируется по одному или нескольким критериям (по общей зоне сканирования, по потенциально опасным зонам, по графикам скоростей/смещений, по превышению установленных геотехнических порогов, по минимальной площади сканирования или одному пикселю, по обратной скорости или иным другим настраиваемым параметрам) специалист производит детальный анализ данных, производит оценку смещений и скоростей смещений.

На следующем этапе производится корреляция полученных результатов с данными мониторинга с других датчиков (тахеометры, ГНСС и др.). При положительной корреляции производится расчет прогнозируемого времени обрушения.

Комплексный анализ данных позволяет принять решение о степени опасности неустойчивого участка, после чего согласно матрице реагирования производят оповещение персонала и при необходимости проводят эвакуацию техники и людей из потенциально опасной зоны.

В случае невыполнения условия корреляции с другими датчиками, расположенными в данной зоне, и явной уверенности в том, что данные ошибочны по каким-либо причинам, происходит отбраковка этих результатов и выполняется анализ возможных причин и условий, приводящих к этим результатам. Мониторинг потенциально опасного участка продолжают.

Однако на практике нередко радарными фиксируются случаи ложного срабатывания и предупреждения о прогрессирующем движении склона и высоком геотехническом уровне опасности. Статистика этих данных будет проанализирована в четвертом разделе данного исследования.

Одной из основных причин возникновения подобных артефактов являются интенсивные атмосферные осадки и быстроменяющиеся погодные условия. Наличие в атмосфере таких диэлектрических неоднородностей, как капли воды, снег, лед, туман или смог, приводит к значительному рассеянию и изменению скорости распространения радиоволн, что в свою очередь вызывает ложные сигналы.

Фаза сигнала (φ) зависит от времени прохождения (t) волны радара,

$$\varphi = -2\pi ft, \quad (12)$$

где φ – фаза сигнала, рад;

f – частота сигнала, герц;

t – время прохождения волны радара, с.

Время прохождения волны радара (t), зависит от скорости волны (v), которая для электромагнитных волн равна скорости света (c), деленной на коэффициент преломления (n) среды атмосферы. Таким образом, после преобразований формула для определения времени прохождения волны радара имеет вид:

$$t = n \frac{2r}{c}, \quad (13)$$

где n – коэффициент преломления;

r – расстояние от радара до цели, м;

c – скорость света в вакууме, м/с.

Изменение фазы принимаемого сигнала $\Delta\varphi$ складывается из двух составляющих: полезная составляющая Δr и составляющая помехи (шума) $\Delta n \cdot r$:

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta r + \left(-\frac{4\pi}{\lambda} \Delta n \cdot r\right), \quad (14)$$

где Δr – реальное смещение цели, м;

$\Delta n \cdot r$ – изменение рефракции атмосферы на каждый метр, м;

$-\frac{4\pi}{\lambda}$ – переходный коэффициент из метров в радианы.

Таким образом, в формуле (14) изменение фазы ($\Delta\varphi$) линейно зависит как от физического смещения цели (Δr), так и от интегрального изменения атмосферной рефракции ($\Delta n \cdot r$), причем оба эффекта переводятся из метров в радианы с одинаковым коэффициентом, характеризующим прохождение сигнала до цели и обратно.

Преобразуем физическую формулу (14) в формулу (15), описывающую прикладную классификацию определения изменения фазы сигнала, с добавлением переменной, отображающую фазовый шум ($\Delta\varphi_{noise}$):

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{def} + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{noise}, \quad (15)$$

где $\Delta\varphi_{def}$ – изменение фазы, связанное с движением деформации, главный критерий, по которому определяется нестабильность пикселя;

$\Delta\varphi_{atm}$ – изменение фазы, связанное с влиянием атмосферных явлений;

$\Delta\varphi_{noise}$ – изменение фазы, вызванное посторонними шумами. При вычислении изменения фазы этим значением пренебрегают.

Ключевой задачей процесса обработки интерферограммы является расчет и учет атмосферных влияний, а также последующее исключение их и сценария постобработки, с целью выделения сигнала, обусловленного исключительно смещением поверхности.

После калибровки и компенсации атмосферного влияния остаточная разность фаз обозначается как $\varphi_2 - \varphi_1$, а величина смещения цели рассчитывается по формуле:

$$\Delta r = -\frac{\lambda}{4\pi}(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (16)$$

где $\varphi_2 - \varphi_1$ – разность фаз между двумя изображениями интерферограммы, м.

Обычно ложные предупреждения радара достаточно легко идентифицировать и распознать природу их появления, однако иногда осадки и/или атмосферные явления настолько сильно искажают данные сканирования, что реальное движение

объекта мониторинга может быть ими замаскировано. В этом случае рекомендуется ограничить или остановить работу в потенциально опасной зоне до тех пор, пока данные не вернутся к состоянию, когда их можно оценивать как достоверные.

Ниже приведены несколько примеров ложных срабатываний из практики, вызванные как метеорологическими условиями, так и воздействием техногенных объектов.

В теплое время года, периодически радары могут фиксироваться ложные срабатывания, связанные с нагревом и тепловым расширением металлических конструкций, а также фоновым излучением линий электропередачи. На рисунке 37 приведен пример ложного срабатывания в летнее время по скоростному фактору на металлический трубопровод. Анализ графика скорости демонстрирует значения до 6,2 мм/ч за временной интервал 1 час, что теоретически могло быть интерпретировано как признак сдвижения коренного массива горных пород и классифицировано как предвестник обрушения. Однако проведенный визуальный осмотр показал, что в этом месте находится вертикальный участок водовода, что позволило идентифицировать сигнал как ложный.

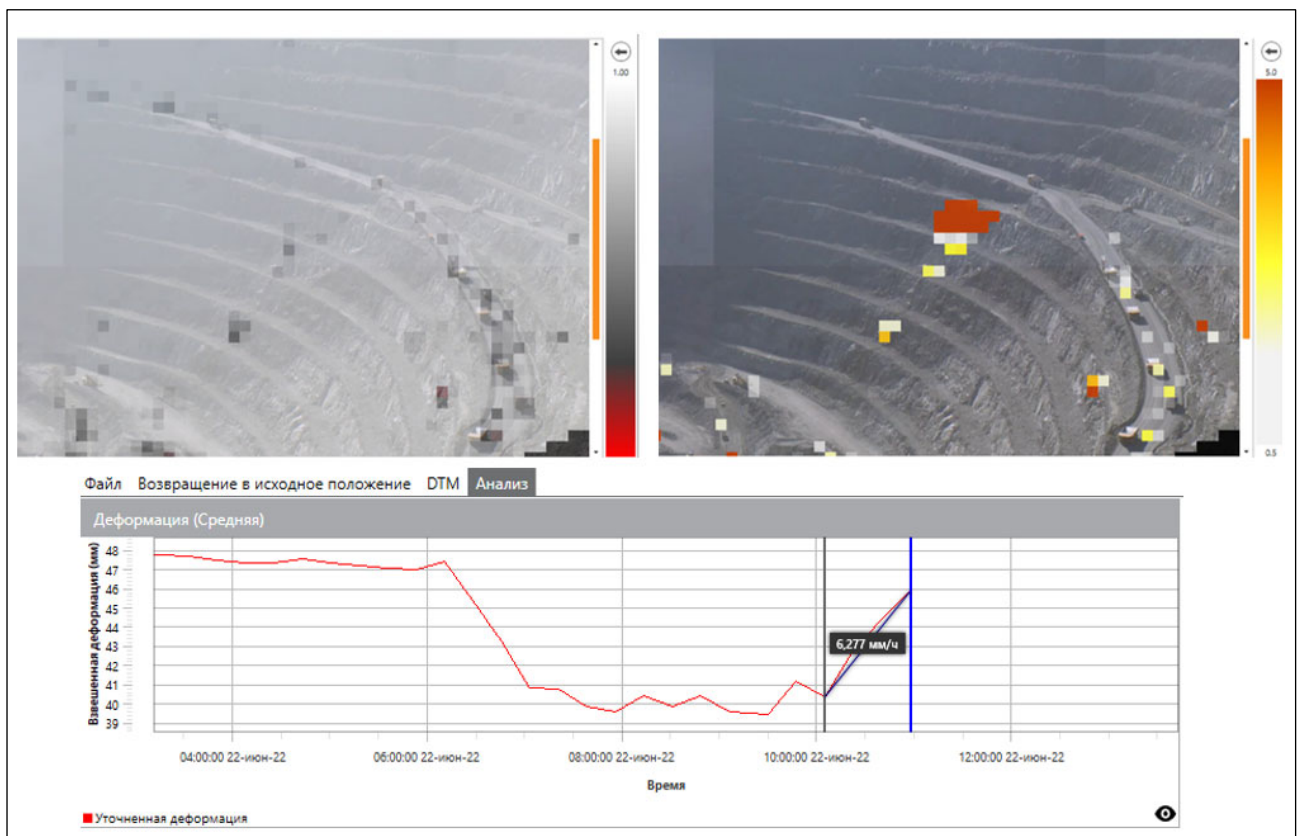


Рисунок 37 – Пример ложного срабатывания на радаре SSR-XT

В холодное время года, вследствие активного образования наледи на обводненных бортах карьера, радар также способен фиксировать рост значений скорости и смещений. Причиной такого эффекта является комплексное воздействие криогенных процессов, включая фазовые переходы воды в состояние льда и температурные деформации ледяного покрова, которые регистрируются радаром как перемещения поверхности. На рисунке 38 представлен пример сильнообводненного участка борта карьера с мощностью слоя наледи до 2 м.



Рисунок 38 – Пример сильнообводненного участка борта в весеннее время

На рисунке 39, *а* представлена интерферограмма сканирования участка карьера радаром Reutech MSR300, на которой видно, что фиксируется смещение. Скорости по отдельным пикселям в местах выхода воды достигали до 2 мм/ч, что в рамках стандартного анализа могло быть ошибочно интерпретировано как признак сдвижения горного массива. На рисунке 39, *б*, этот же участок карьера отображен в режиме тепловизорной съемки. С помощью камеры, оснащенной тепловизором,

удалось легко отследить места выхода грунтовых вод на поверхность и исключить геодинамическую природу зарегистрированных смещений.

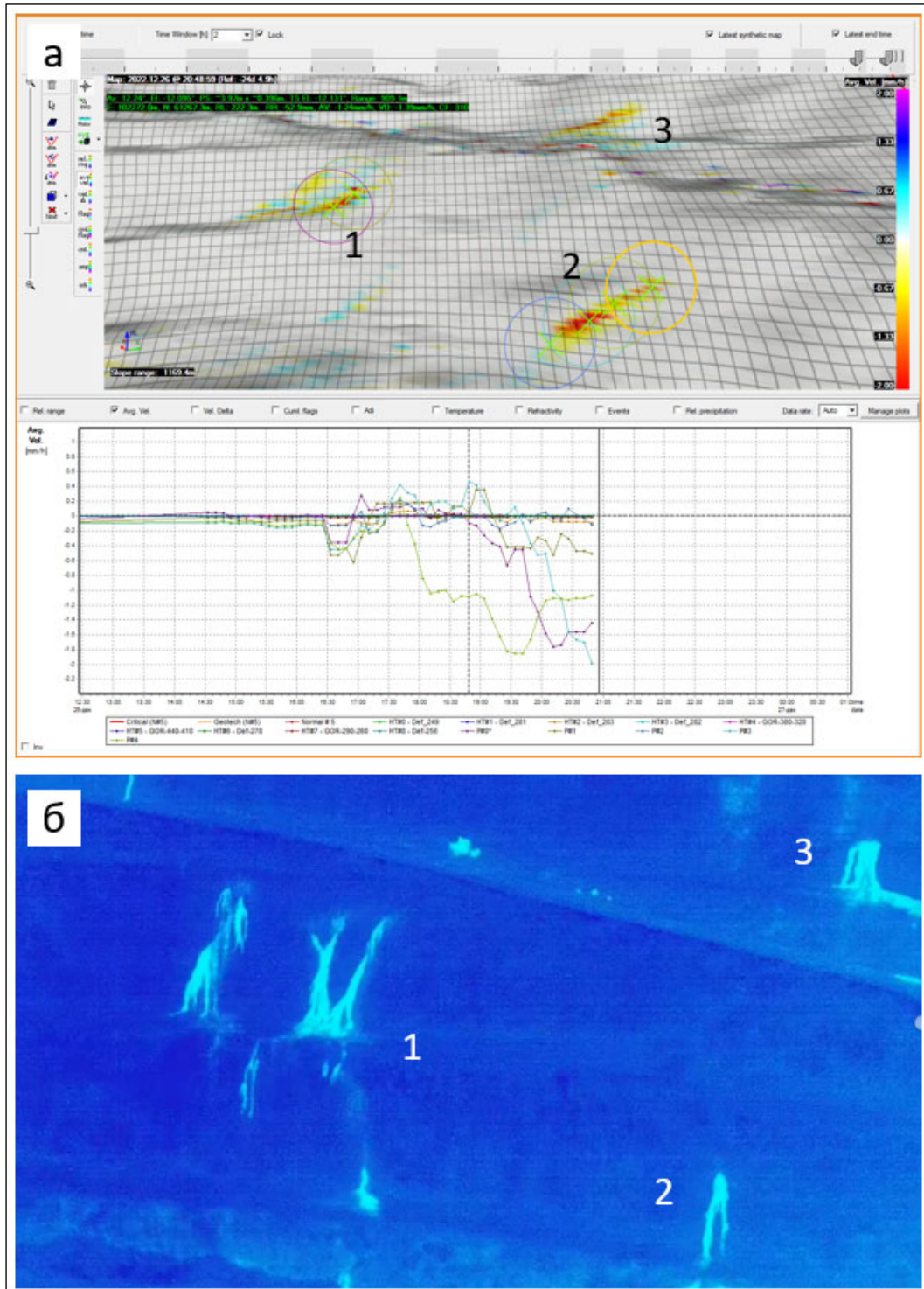


Рисунок 39 – Пример ложного срабатывания из-за водопроявления радаром Reutech MSR300 в зимнее время: а) интерферограмма сканирования радаром и графики нестабильных точек; б) тепловизионная съемка участка

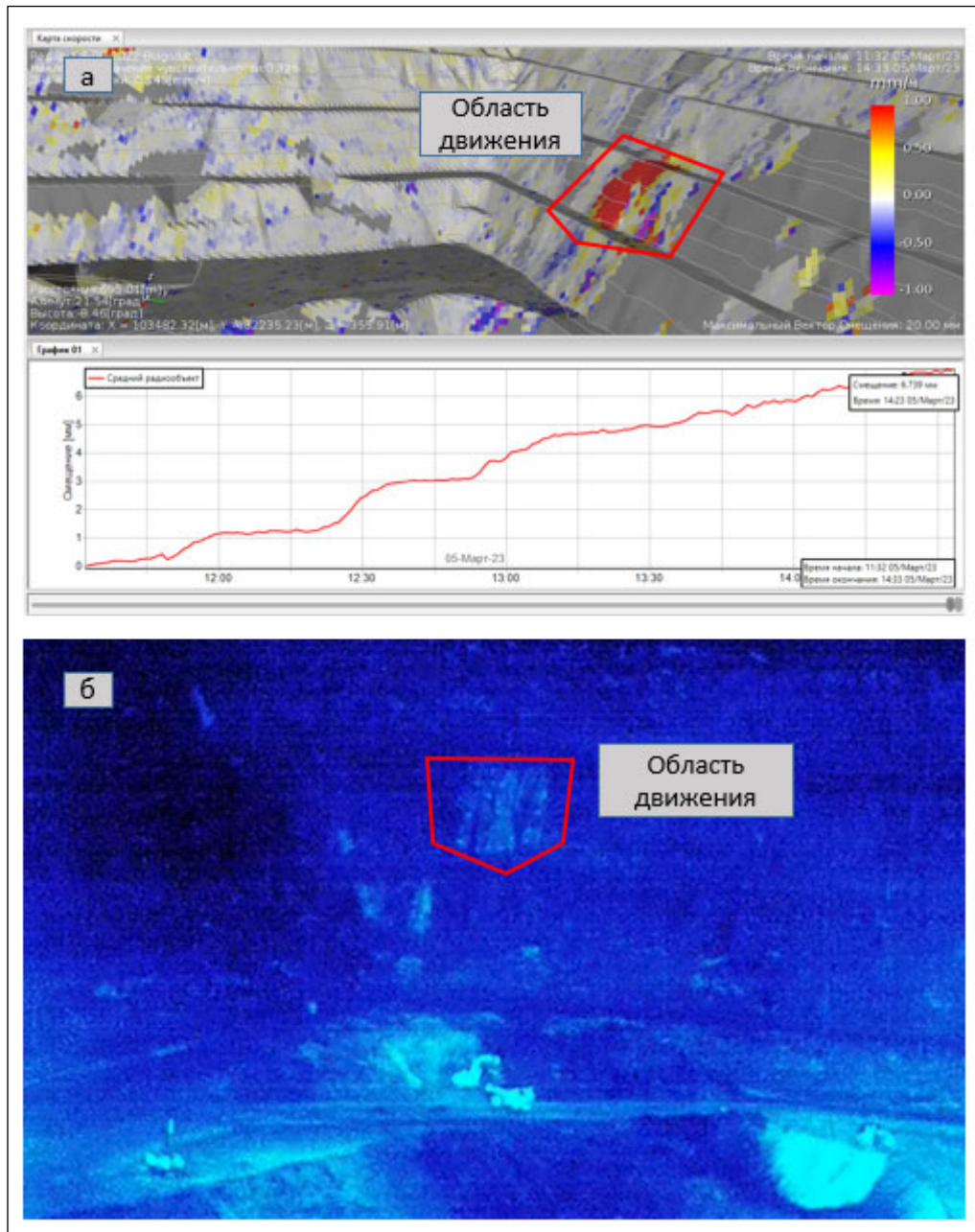


Рисунок 40 – Пример ложного срабатывания из-за водопроявления радаром IDS Hydra X в зимнее время; а) – интерферограмма сканирования радаром и графики нестабильной; б) – тепловизионная съемка участка

Еще один пример регистрирования смещения на выход воды представлен на рисунке 40. На рисунке 40, а показана интерферограмма сканирования борта карьера мобильным радаром IDS Hydra X. На рисунке 40, б, этот же участок карьера изображен в режиме тепловизионной съемки, по результатам которой четко видна область фильтрации воды с последующим образованием наледи. Смещение по

двухчасовому диапазону составляло около 2–3 мм/ч. Скорость движения фиксировалась в диапазоне 2 мм/ч. В данном случае правильная интерпретация причины зарегистрированных смещений является критически важной задачей, поскольку в непосредственной близости от этих смещений располагается работающая техника.

Приведенные примеры ложных срабатываний радара указывает на то, что круглогодично внешние техногенные и природные факторы могут приводить к сигналам, которые ошибочно могут быть приняты за опасное смещение горного массива.

Добыча полезных ископаемых в России в большинстве случаев ведется в суровых климатических условиях, с обильными осадками в виде снега, который может не таять до 9 месяцев в году [26]. Физически, как было указано ранее, сигнал интерферометрического радара способен проходить сквозь толщу снега и льда, достигая поверхности горной породы и отражаясь от нее, однако как показала практика, снег и лед напрямую влияют на интерпретацию данных сканирования. Это происходит вследствие того, что распространение сигнала в снежной среде происходит с меньшей скоростью, поэтому волна имеет меньшую длину (рисунок 41).

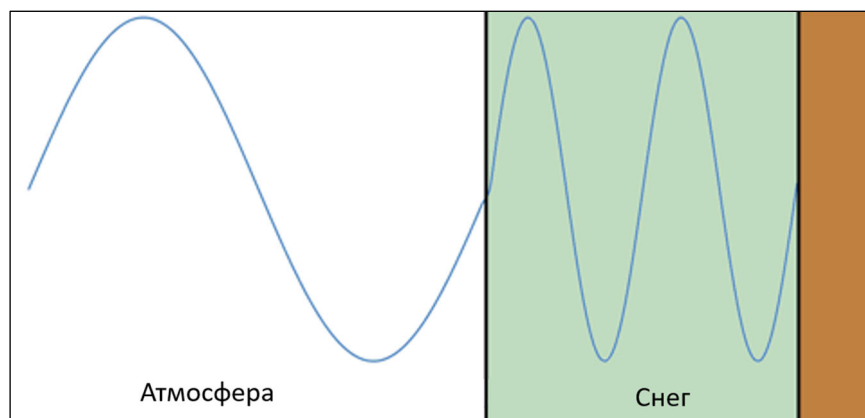


Рисунок 41 – Изменение длины волны из-за слоя снега

При стабильной мощности снежного покрова радарный мониторинг демонстрирует высокую достоверность данных. Однако любые изменения мощности снежного покрова будут влиять на результаты измерений. При изменении слоя снежного покрова изменится и фаза сигнала. Поэтому при радарном мониторинге

зимой необходимо отдельно учитывать составляющую $\Delta\varphi_{\text{снег}}$, характеризующую помехи от изменений снежного или ледяного покрова:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{деф}} + \Delta\varphi_{\text{атм}} + \Delta\varphi_{\text{снег}}, \quad (17)$$

где $\Delta\varphi_{\text{снег}}$ – помехи от изменений снежного покрова, рад.

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

$$\Delta\varphi_{\text{снег}} = -\frac{4\pi c \Delta h_{\text{снег}}}{\lambda} \left(\frac{1}{v_{\text{снег}}} - \frac{1}{c} \right), \quad (18)$$

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

$v_{\text{снег}}$ – скорость света в снегу, м/с;

λ – длина волны в воздухе, м;

c – скорость света, м/с.

Смещение, являющееся следствием изменения толщины снежного покрова, определяется по формуле:

$$\Delta d_{\text{снег}} = \Delta h_{\text{снег}} \left(1 - \frac{c}{v_{\text{снег}}} \right), \quad (19)$$

Подставляя в формулу (19) скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с) и скорость света в уплотненном и увлажненном снеге ($2,29 \cdot 10^8$ м/с), получаем измеряемое радаром смещение $\Delta d_{\text{снег}} = -0,31 \cdot \Delta h_{\text{снег}}$.

Стоит отметить, что для более точной компенсации необходимо использовать значения скорости света в снеге от $1,8 \cdot 10^8$ до $2,3 \cdot 10^8$ в зависимости от типа и плотности снежного покрова.

Циклические процессы аккумуляции и таяния снежного покрова генерируют смещения, принципиально отличающиеся от реальных деформаций бортов карьера, и могут быть легко интерпретированы опытным специалистом [103].

Как видно, на рисунках 42 и 43, при оттайке и в период активного снегопада интерферограммы сканирования показывают похожие результаты. На обоих примерах видны хаотичные (мозаичные) зоны увеличения скоростей в пределах одного

блока как в положительную сторону – движение от выработанного пространства (фиолетовый цвет), так и в отрицательную – движение в выработанное пространство (красный цвет) стороны, что не характерно для деформации горного массива.

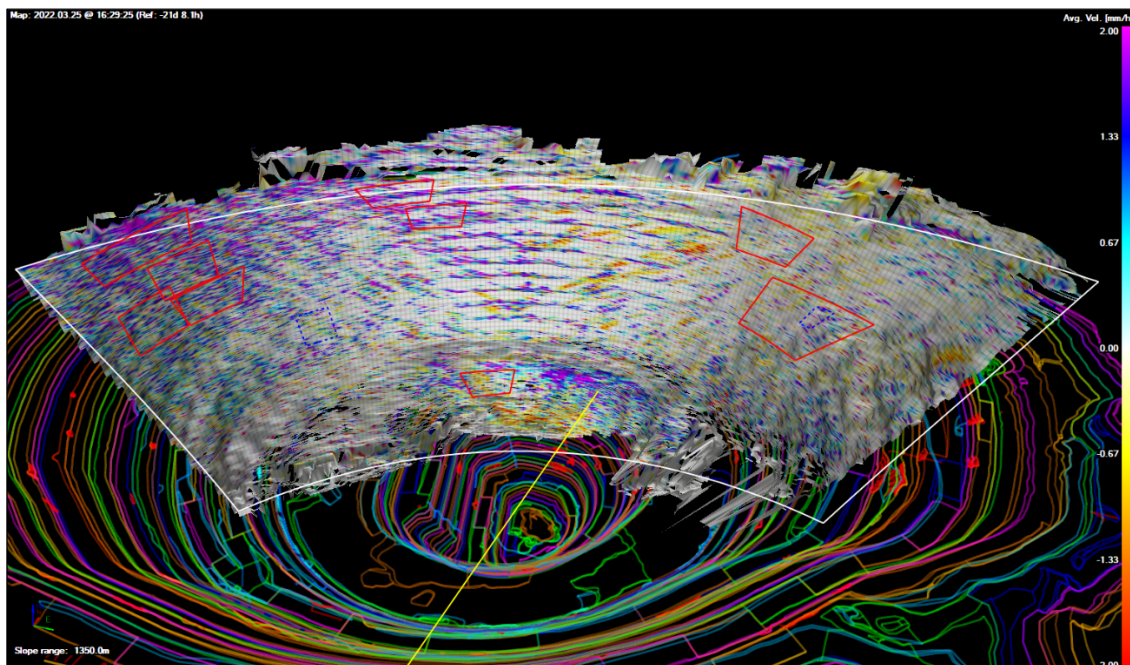


Рисунок 42 – Интерферограмма скорости в период оттайки бортов

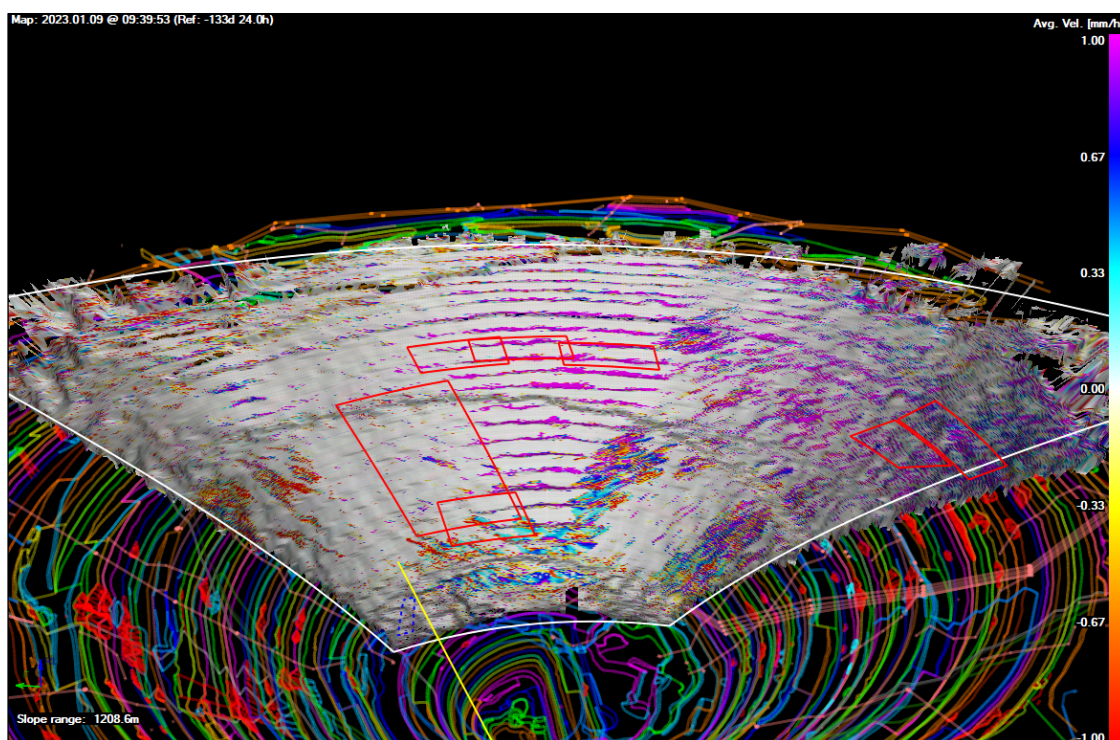


Рисунок 43 – Интерферограмма скорости в период активного снегопада

После идентификации артефактов, связанных с процессами оттайки или снегопада, для лучшей визуализации данных может быть применена корректировка градиентной шкалы скоростей с увеличением ее диапазона на несколько миллиметров.

Для ослабления влияния погодных условий на радарные измерения применяется атмосферная коррекция. Как отмечалось ранее, существует несколько способов для минимизации влияния метеоусловий:

- введение поправок в данные измерений посредством алгоритмов радара на основе информации с метеостанции;
- задание пользователем условных зон устойчивости;
- программная автоматическая отбраковки пикселей с низкой когерентностью;
- отслеживания статистических изменения пикселей для классификации областей, подходящих для атмосферной коррекции, и некоторые другие методы.

В данном разделе более подробно рассмотрим только один базовый метод атмосферной коррекции, при котором пользователь радара сам задает условные зоны устойчивости. Остальные методы реализованы производителями радаров в качестве встроенных алгоритмов, не предусматривающих возможности вмешательства со стороны пользователя.

Базовый метод для коррекции атмосферного влияния требует указания специалистом условных зон устойчивости, которые являются наземными контрольными точками. Это могут быть как участки стабильных зон бортов карьера, которые специалист по геодезическому мониторингу считает устойчивыми, так и специально установленные уголковые отражатели. Рекомендуется использовать именно уголковые отражатели, закрепленные на неподвижных пунктах, поскольку вероятность их смещения меньше, чем участки борта карьера.

Коррекция атмосферы основывается на небольших областях, которые считаются условно стабильными и 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 для больших карьеров соблюдается не всегда. Поправка атмосферной коррекции рассчитывается и обновляется с каждым новым сканированием наблюдаемой зоны.

При использования уголковых отражателей их устанавливают на устойчивых участках карьера. Отражатель представляет собой три взаимноперпендикулярные металлические пластины, сходящиеся в одной точке. Соотношение эффективной площади рассеивания уголкового отражателя во много раз превышает его геометрическую площадь, а высокая амплитуда обратного сигнала обеспечивает высокую точность вычисления фазы сигнала при его незначительных смещениях. Именно такие отражатели применяются для калибровки и поверки радаров.

По измерениям сигнала от уголковых отражателей можно рассчитать поправку за метеоусловия и применять на все участки сканирования бортов, выявляя истинное смещение [112]. Пример мест размещения уголковых отражателей или условных зон устойчивости на борту карьера приведен на рисунке 44.



Рисунок 44 – Пример мест размещения уголковых отражателей и условных зон устойчивости.

На рисунке 45 изображены условия, при которых можно считать коррекцию атмосферных явлений качественной. Первым признаком качественной коррекции является график когерентности, который имеет вид горизонтальной линии, близкий к единице. Резкие изменения (скачки) на графике когерентности сигнализируют об атмосферных явлениях. Вторым критерием является высокая степень совпадения индекса атмосферной рефракции по графикам от метеостанции и УЗУ (условных зон устойчивости). Дополнительным подтверждением эффективности модели атмосферной компенсации служит график расхождения между скорректированными данными от метеостанции и УЗУ, который стремится к нулевому значению.

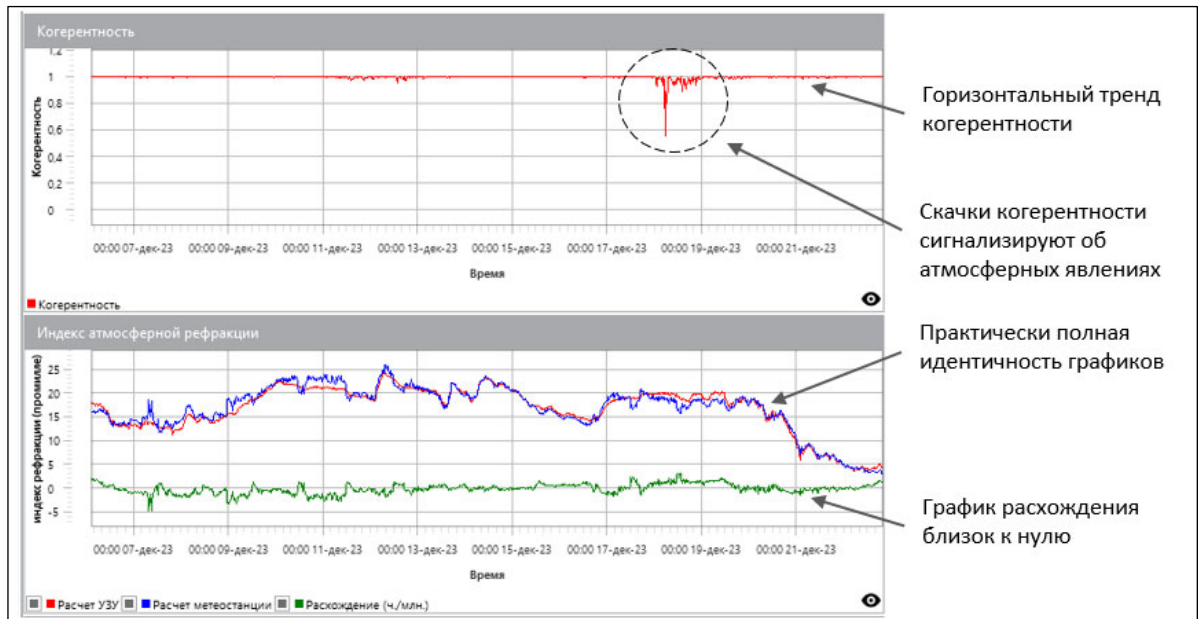


Рисунок 45 – Пример качественной коррекции атмосферных явлений

На рисунке 46 представлен пример некачественной коррекции атмосферных явлений. По графику когерентности можно построить нисходящий тренд, что свидетельствует о прогрессирующей декорреляции сигнала. Между графиками расчета метеостанции и УЗУ (условные зоны устойчивости) наблюдаются систематические расхождения, и график расхождения показывает значимое отклонение от нулевого значения.

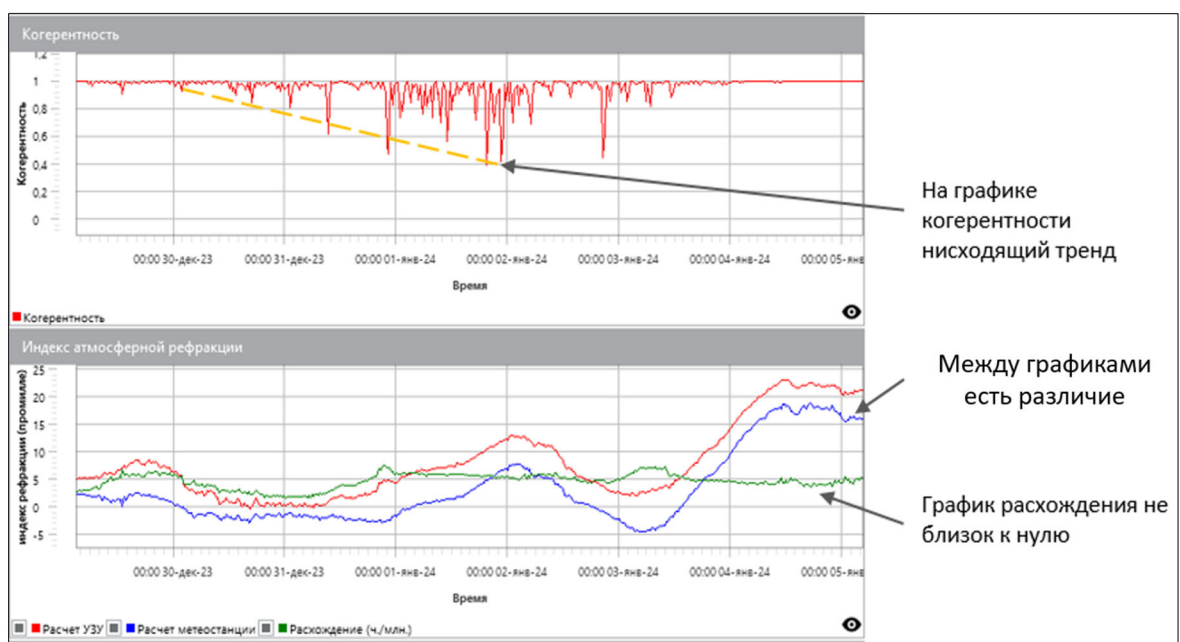


Рисунок 46 – Пример некачественной коррекции атмосферных явлений

Взрывные работы сильно влияют на качество и структурную целостность горного массива, вследствие ударного эффекта и локальной передачи энергии в массив горной породы. Появляются новые трещины, расширяются уже существующие. На рисунке 47 приведена интерферограмма сканирования борта после проведения взрывных работ.

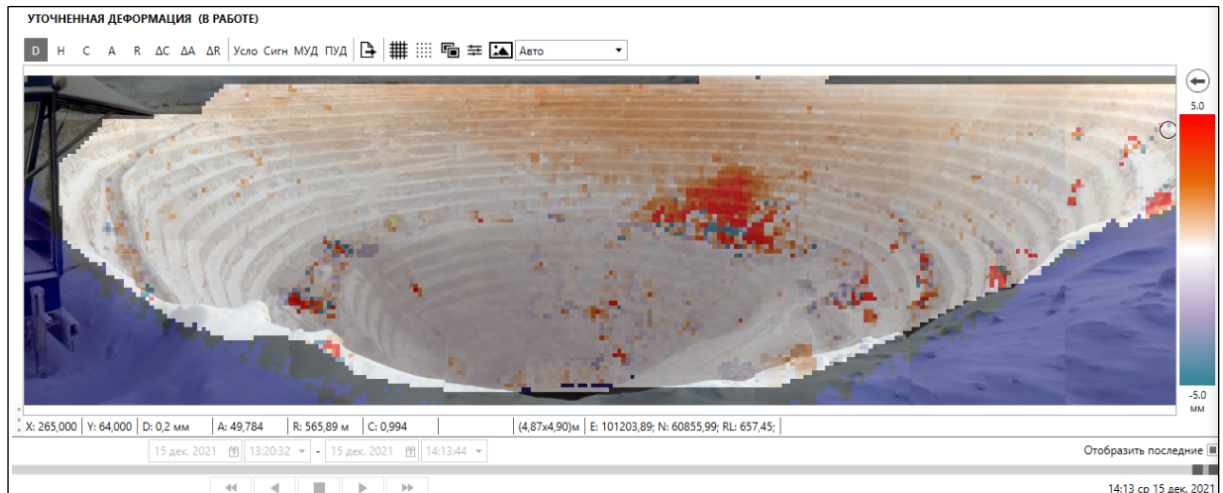


Рисунок 47 – Интерферограмма усредненной деформации после проведения взрывных работ

Обычно после проведения взрывных работ наблюдается немедленное увеличение регистрируемой деформации, за которым следует четко выраженная регрессивная динамика деформации в течение некоторого периода стабилизации массива после взрыва. В зависимости от времени стабилизации откоса, можно сделать вывод о степени нарушенности горной породы взрывом. Шкала оценки повреждения горного массива после взрыва, представленная группой исследователей на австралийском симпозиуме стабильности склонов в 2020 г., приведена в таблице 17 [104].

Таблица 17 – Шкала оценки повреждения горного массива после взрыва

Время стабилизации откоса	Степень разрушенности откоса
Менее 3 часов	Незначительный
От 3 до 6 часов	Низкий
От 6 до 12 часов	Умеренный
От 12 до 24 часов	Значительный
Более 24 часов	Очень значительный

Нередко происходят ситуации, когда при работе техники на рабочем горизонте происходит локальная, быстроразвивающаяся деформация. Обнаружение подобных деформаций методом наземного интерферометрического сканирования может быть затруднено вследствие электромагнитных помех от работающего технологического оборудования.

В крепких породах камнепады, клиновидные и деформации плоского сдвига в пределах одного уступа характеризуются короткой фазой ускорения, предшествующей обрушению. Если интервал между сканированием борта превышает продолжительность фазы ускорения, то радар не может зафиксировать такую деформацию [96].

Хотя подобные деформации не приводят к значительным экономическим затратам, внезапные обрушения рабочих уступов создают серьезные риски для производственной безопасности, что обуславливает необходимость минимизации подобных явлений. Современным решением данной проблемы является совместное применение радаров с синтезированной апертурой (SAR) и реальной апертурой (RAR) в качестве взаимодополняющих систем. 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.

3.2 Методика расчета объемов вскрышных работ

по данным сканирования наземных интерферометрических радаров

При открытой разработке месторождений полезных ископаемых маркшейдерский учет объемов горной массы является важным этапом. От правильного учета зависит контроль выполнения предприятием планов вскрышных и добычных работ, а также формирование исходных данных для учета движения промышленных запасов, уровня потерь и степени разубоживания руды.

Если на объекте горных работ в систему мониторинга внедрены наземные интерферометрические радары с реальной апертурной решеткой (RAR), появляется

теоретическая возможность использовать результаты сканирования не только для мониторинга устойчивости, но и для вычисления объемов вскрышных работ и обрушившейся горной массы, без необходимости присутствия маркшейдера в карьере или опасной зоне [61].

Исследования, представленные в данном разделе, выполнялись в период с 15 по 18 августа 2021 г. Их основой являются результаты интерферометрического сканирования борта карьера радиолокационной станцией Reutech MSR300, работающей по технологии реальной апертурной решетки (RAR).

Маркшейдерский контроль добычи и вскрыши проводится с целью обеспечения достоверного учета извлекаемых и оставляемых в недрах запасов добываемых полезных ископаемых и включает в себя периодический подсчет объемов вынутых горных пород, определение средней полноты загрузки карьерных автосамосвалов с целью повышения точности оперативного учета, измерение остатков полезного ископаемого на складах и корректировку их объемов.

В настоящее время маркшейдерская съемка забоев экскаватора выполняется с использованием различного оборудования, такого как электронные тахеометры, ГНСС-оборудование, лазерные сканеры и реде БПЛА [66]. Первые два способа получили широкое распространение на отечественных и зарубежных горных предприятиях. Последние два способа требуют значительных временных и технических затрат, а также более высокзатратны, что часто экономически неоправданно.

Данные, получаемые с радарной системы, представляют собой массив точек, каждая из которых имеет координаты (x, h, z) . Для обработки этих данных и построения цифровой модели поверхности карьера с повышенной точностью применяется специализированное программное обеспечение ScatterX, разработанное компанией Reutech. Данный программный комплекс реализует алгоритмы интерполяции и фильтрации, позволяющие реконструировать непрерывную поверхность по дискретным измерениям с учетом поправок на атмосферные эффекты и геометрию сканирования [72].

На рисунке 48 в интерфейсе ПО НМІ область внутри выделенного контура, выделенная красным цветом, визуализирует зону нестабильных пикселей, это зона активного перемещения горной массы, в которой находится забой экскаватора.

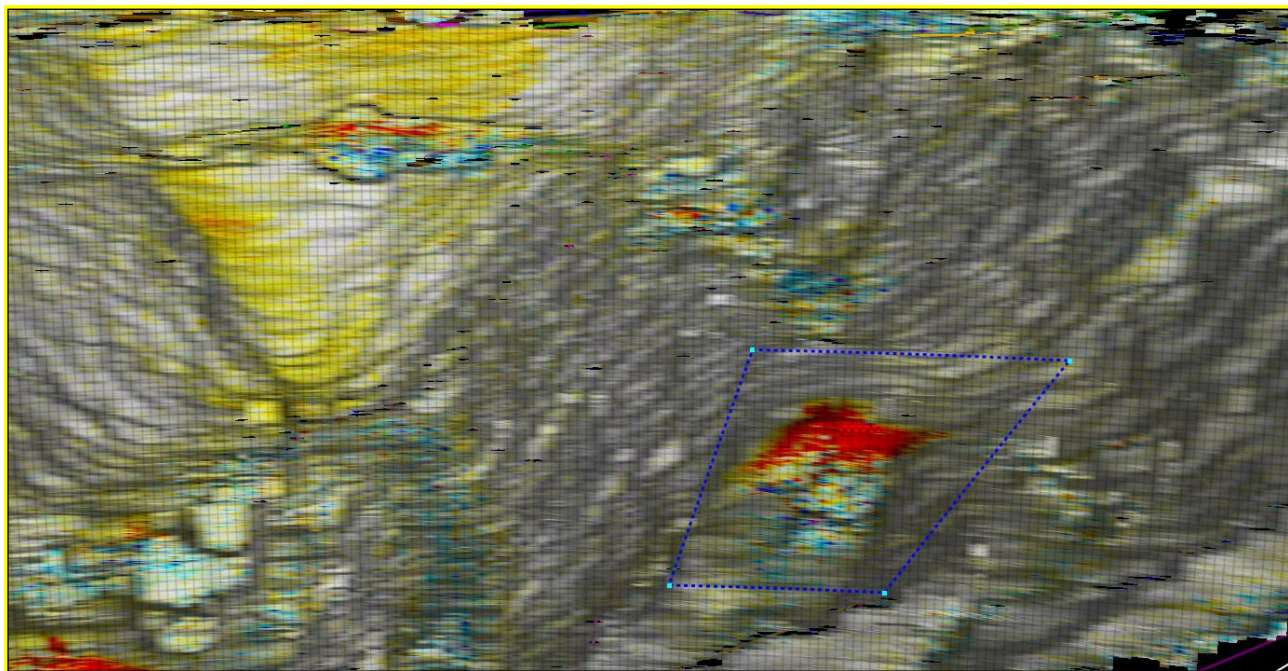


Рисунок 48 – Вид с радара в ПО НМІ.

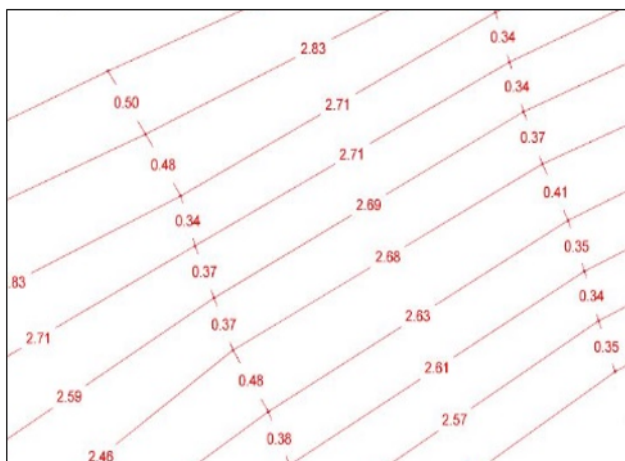
Синим контуром выделена зона экспорта точек

При определении объема вынутых (взорванных) горных пород в разрыхленном состоянии по маркшейдерской съемке и перевычислении его в объем в целике через коэффициент разрыхления этих пород допустимая погрешность $\sigma_{V_{\text{доп}}}$ (%) из двух и более независимых определений не должна превышать 2 %. Это требование изложено в нормативном документе «Об утверждении Правил осуществления маркшейдерской деятельности» [56].

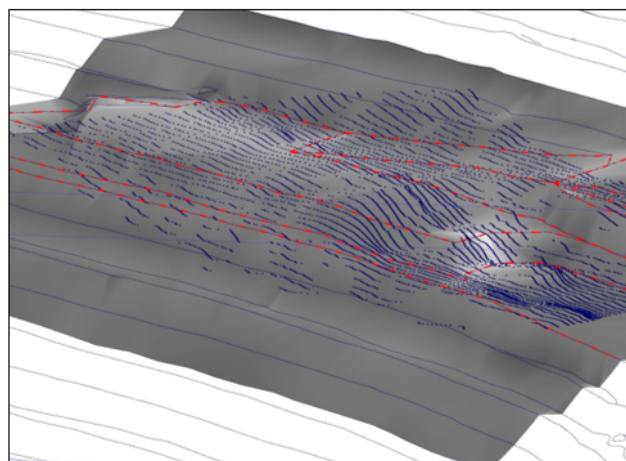
В рамках проведенных исследований были выполнены два эксперимента по расчету объема отгруженной горной массы, выполненных на разных карьерах, с разным расстоянием от радара до забоя экскаватора.

В первом эксперименте дистанция от радара до забоя составляла 700 м. При экспорте облака точек с интерферограммы сканирования, для выбранной области

было получено 8 148 значений. Средняя длина сетки составила 2,62 м, ширина 0,47 м (рисунок 49, а). Наиболее затратным по времени оказалась обработка и структурирование данных в ПО Micromine (рисунок 49, б).



а)



б)

Рисунок 49 – Эксперименты по расчету объема: а) – экспортированное облако точек с радара; б) – облако точек, импортированное в ПО Micromine

Ключевым этапом обработки данных является построение характерных линий, а именно верхней и нижней бровки забоя, по которым будет строиться поверхность. Этот этап является обязательным, так как работающая в забое техника вносит искажения в результаты сканирования. Для повышения достоверности определения объёма взорванной породы, из массива данных были исключены все точки, попадающие в активную зону забоя, за исключением тех, которые формируют характерные линии.

По полученному облаку точек были построены верхняя и нижняя бровки забоя (рисунок 50), однако значительная избыточность исходных данных обусловила высокие временные затраты на выполнение данной операции. Сравнение результатов расчетов объемов, полученных по данным радара и ГНСС-измерениям, составила 212,44 м³, что соответствует разнице в 1,61 %. Данная погрешность не выходит за рамки допустимой, указанной в действующих нормативных документах [56], что подтверждает достаточную точность предлагаемого метода.

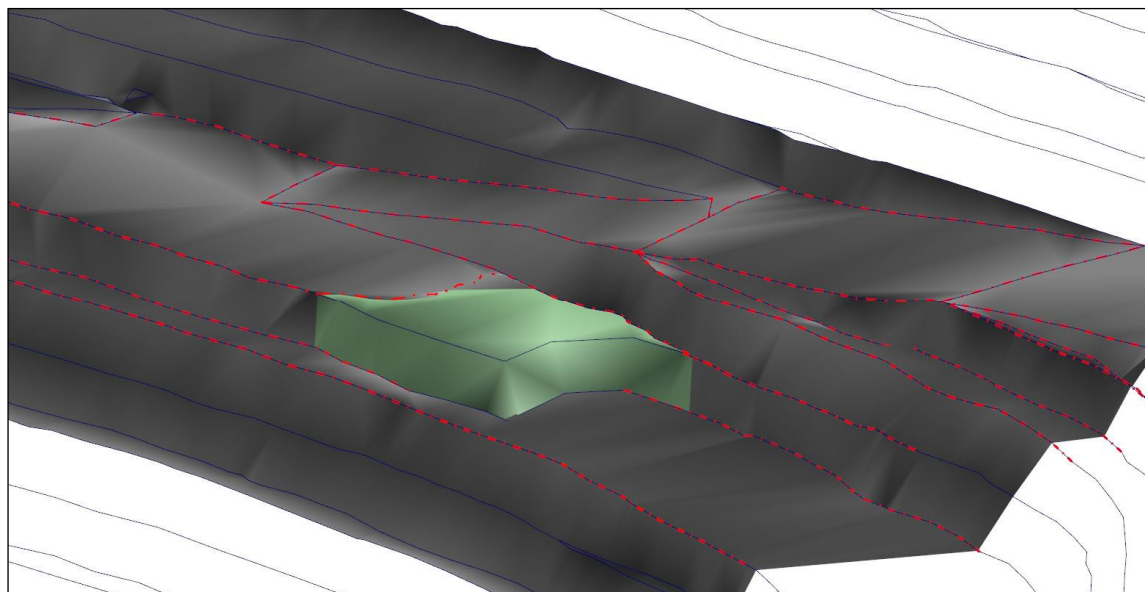


Рисунок 50 – Зона выемки взорванной горной массы экскаватором
с 15.08.2021 по 18.08.2021

Во втором эксперименте дистанция от радара до забоя была увеличена до 1 200 м. Размер сетки точек составил около 11 м в ширину, и 3 м в длину. При таком увеличении горизонтального расстояния между точками (с 2,62 до 11 м) выделение из общего массива точек, по которым строятся характерные линии верха и низа забоя, значительно усложняется. Несмотря на сложности, по аналогии с первым экспериментом по полученному массиву точек удалось определить верхний и нижний контур забоя, используя цифровую модель карьера, загруженную в ПО Micromine. Расхождение между результатами расчетов объемов по данным радара и ГНСС измерениями составило 1 294,32 м³, что соответствует погрешности в 3,19 %. Полученные результаты демонстрируют четкую зависимость: увеличение дистанции сканирования приводит к росту погрешности вычислений объема. Данная закономерность является ожидаемой, поскольку с ростом расстояния снижаются плотность и детализация облака точек, что напрямую влияет на точность построения контурных линий и последующих вычислений.

При традиционных методах измерений маркшейдер, снимая положения забоя, производит измерение характерных точек, поворотов и выступов, по которым впо-

следствии считается объем вынудой горной массы. При сканировании забоя лазерным сканером получают облако точек высокой плотности, по которому также достаточно легко определить характерные линии и произвести расчет объема вынудой горной массы по данным сканирования.

Основная сложность интерпретации данных интерферограммы сканирования радара связана с тем, что облако точек радара имеет большое количество избыточных измерений, которые при построении верхней и нижней бровок забоя вносят дополнительную неверную вариативность определения характерных линий забоя. Работающая непосредственно в забое техника вносит неоднозначность в результаты сканирования. Однако при соблюдении условий, когда радар находится на расстоянии в 300–500 метров от забоя, и угол луча радара максимально близок к перпендикуляру, области влияния техники можно без особых трудностей исключить, а нижнюю и верхнюю бровку определить с достаточной точностью.

В таблице 18 приведены результаты сравнения определения объемов горной массы посредством маркшейдерской съемки с использованием ГНСС-приемника, и по данным наземного интерферометрического сканирования. В первом эксперименте на расстоянии в 700 м от сканируемого участка погрешность, с которой определен объем горной массы, не превышает 2 %, что является допустимой по действующим нормативным документам.

Во втором эксперименте, при увеличении расстояния до 1 200 м, расхождение увеличилось до 3,19 %, что уже не является допустимым, согласно действующего законодательству [56].

Таблица 18 – Результаты определения объемов методом ГНСС-измерений и по результатам наземного интерферометрического сканирования

№	Объем (м ³) ГНСС-оборудование	Объем (м ³) Радар	Расстояние (м)	Погрешность (%)	Допуск (%)
1	12 982,42	13 194,86	700	1,61	2
2	41 868,67	40 574,35	1200	3,19	2

Проведенный анализ результатов практических исследований по сравнению точности вычисления объемов горной породы между традиционными методами, такими как маркшейдерская съемка с использованием электронных тахеометров и ГНСС-приемников, и способом радарной интерферометрии, позволяет сформулировать следующие выводы.

1 Вычисление объемов вскрышных работ методом наземной интерферометрии возможно, однако имеются сложности с корректной интерпретацией данных сканирования и определением характерных линий при значительном удалении радара от наблюдаемого участка, вследствие низкой плотности точек.

2 В первом эксперименте (дистанция до объекта сканирования 700 м) расхождение между результатами традиционной съемки и метода наземного интерферометрического сканирования не превышает установленные законодательством допуски. При увеличении расстояния до сканируемого объекта, точность метода снижается и становится неудовлетворительной (второй эксперимент).

3 Целесообразность метода имеет право на существование и применение в случае, когда маркшейдер физически не имеет возможности произвести съемку ввиду климатических, погодных или иных условий, а также при организации на карьере системы мониторинга с использованием наземного интерферометрического сканирования.

Таким образом, несмотря на определенные сложности интерпретации исходных данных, методика расчета объема горной массы забоя экскаватора или обрушившейся горной массы методом наземного интерферометрического сканирования имеет перспективы внедрения ее на горнодобывающих предприятиях России в качестве дополнительного инструмента оперативного контроля. С ростом интереса российских горнодобывающих компаний к внедрению наземных интерферометрических радаров в систему мониторинга и совершенствованию методов интерпретации данных интерферометрического сканирования, предложенная методика может становиться более востребованной.

3.3 Сравнение данных сканирования радаров с результатами геодезических методов наблюдений

Несмотря на разнообразие применяемых технологий, вопрос сравнительной эффективности различных методов мониторинга, особенно в части оперативного выявления начальных стадий деформационных процессов, остается актуальным [41, 105].

В данном разделе выполнен сравнительный анализ данных мониторинга, полученных с использованием наземного интерферометрического радара Reutech MSR300, и результатов традиционных геодезических измерений [75]. В качестве исходных данных инструментальных методов в период с 12.10.2021 г. по 18.11.2021 г. были использованы результаты измерений смещений по трещиномерам и забивным отражательным реперам автоматизированной системой мониторинга Leica GeoMos.

Методы мониторинга и сбора данных, используемые в качестве основы для анализа в данной работе, а также периодичность выполнения измерений, их основные отличия, преимущества и недостатки представлены в сводной таблице 19. Мониторинг с использованием наземного интерферометрического радара представляет собой площадной метод, при котором радарный сигнал сканирует сплошную зону борта карьера с заданной периодичностью. Исходя из того, на каком удалении от сканируемого участка установлен радар, изменяется и шаг сетки сканирования [64, 97, 93]. Измерения по трещиномерам и отражательным реперам роботизированным тахеометром относятся к точечным методам мониторинга, так как измерения сдвижения горного массива выполняются только в тех точках, где установлены трещиномеры или реперы.

Таблица 19 – Сводная таблица методов мониторинга

Критерий сравнения	Reutech MSR300	Leica TM50	Трещиномер
Принцип действия	Радарная интерферометрия	Геометрическое измерение	Ручной замер
Измерение	Смещение множества точек относительно линии визирования	3D-координаты отражателей	Относительное смещение трещины
Пространственное разрешение	Более 10 000 точек	4 отражателя	4 трещиномера
Точность измерений	0,2 мм	$\pm (0,6 \text{ мм} + 1,0 \text{ ppm})$	1 мм
Частота измерений	15 мин	2 часа	12 часов
Зона покрытия	Сплошная	Точечная	Точечная
Преимущества	Дистанционный, круглосуточный мониторинг, полное покрытие борта карьера, выявление небольших опасных участков деформации	3D-вектор смещения, автоматизированные измерения с заданной частотой	Прямое измерение раскрытия трещины
Недостатки	Измеряет смещение, перпендикулярное лучу радара, наличие ложных срабатываний от атмосферы и техники, высокая стоимость	Точечный контроль. Риск пропустить деформацию между реперами. Требуется доступ для установки отражателей на опасном участке, потеря отражателей при обрушении	Точечный контроль. Требуется доступ для установки трещиномеров на опасном участке, потеря трещиномеров при обрушении

В период с 10.10.2021 г. в пределах потенциально опасного участка ранее зафиксированной деформации, по данным сканирования наземного интерферометрического радара Reutech MSR300, было зафиксировано увеличение скоростей смещения горного массива до 2,03 мм/ч (рисунок 51). Данная скорость является маркером геотехнической опасности и позволяет сделать вывод о том, что на данном участке началась активизация процесса деформации. В этот же день, при детальном обследовании участка и зоны увеличения скоростей смещения с применением квадрокоптера DJI

Mavic 3, нарушения целостности горного массива и признаков начинающихся деформационных процессов выявлено не было. За участком был установлен усиленный контроль, включающий сканирование потенциально опасной зоны радаром, а также ежесменный визуальный осмотр. В последующие сутки по результатам сканирования радаром данная зона характеризовалась нестабильным смещением горного массива в выявленной зоне. Скорости смещения варьировались от 0,1 до 1,5 мм/ч, с периодическим затуханием и остановкой скоростей смещения на несколько часов.

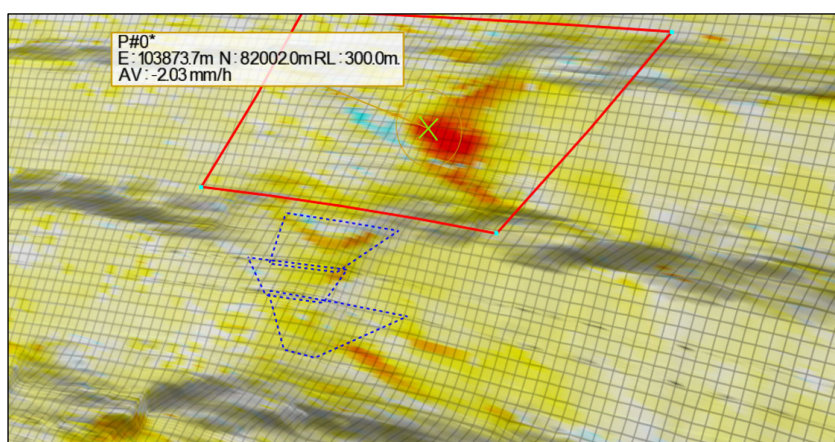


Рисунок 51 – Интерферограмма сканирования радаром Reutech MSR300 до обнаружения трещин по полотну капитального съезда

12.10.2021 г. в ходе ежесменного визуального обследования по полотну капитального съезда была выявлена трещина протяженностью около 30 м, и максимальным раскрытием до 2 см (рисунок 52).



Рисунок 52 – Трещина в дорожном полотне капитального съезда

Таким образом, радар зафиксировал смещение горного массива в потенциально опасной зоне более чем за 48 часов до визуального выявления трещины по полотну съезда.

Для мониторинга динамики раскрытия трещины и оценки устойчивости горного массива на данном участке была развернута система контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), включающая 4 трещиномера и 4 отражателя. Мониторинг осуществлялся с использованием роботизированного тахеометра Leica TM50 в режиме автоматизированного наблюдения (рисунок 53).

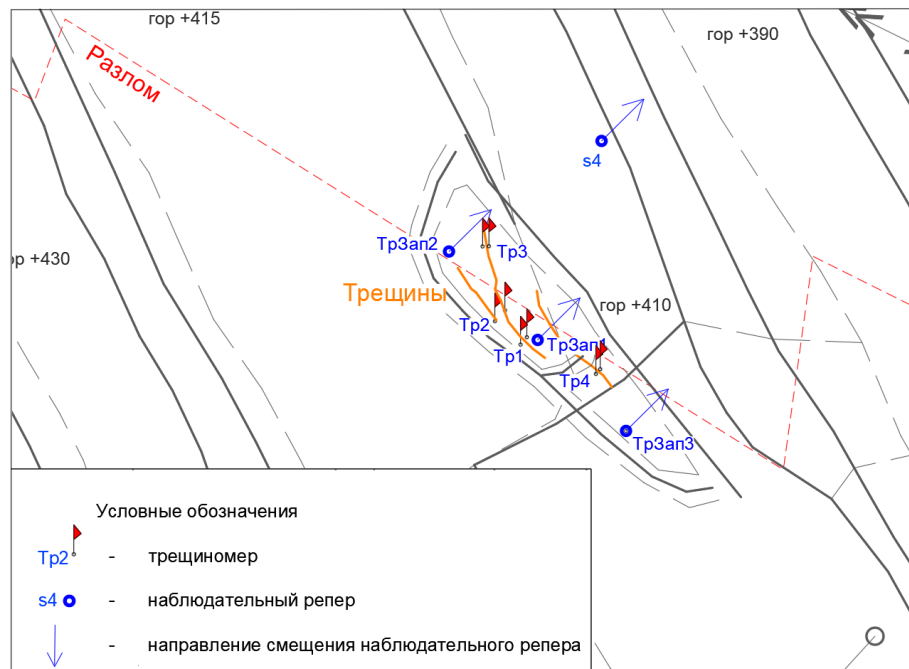


Рисунок 53 – Схема размещения КИА на участке наблюдений за деформацией

На момент визуального обнаружения трещины радаром фиксировалась четко локализованная зона с увеличением скорости смещения горного массива до 1,8 мм/ч. Повышенные скорости смещения горного массива были зарегистрированы как непосредственно в районе съезда, так и на участке, простирающемся на 60 м ниже, что свидетельствовало о развитии глубинного деформационного процесса. Получаемые данные демонстрировали устойчивую тенденцию к нарастанию скорости смещения, указывая на прогрессирующий характер нарушения устойчивости горного массива (рисунок 54).

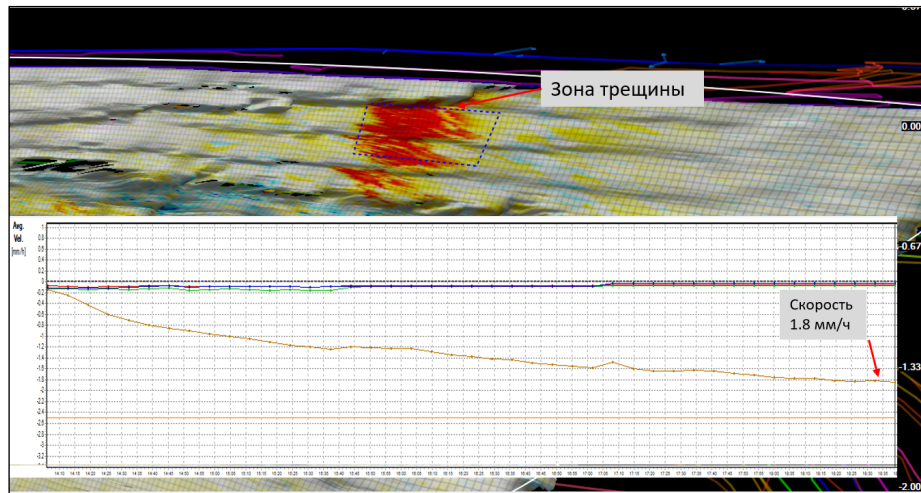


Рисунок 54 – Интерферограмма сканирования радаром Reutech MSR300 в момент обнаружения трещин по полотну капитального съезда

Анализ данных производился по продольному смещению по отражательным реперам, трещиномерам и результатам сканирования радара Reutech MSR300. В силу технических особенностей, как уже упоминалось, радар регистрирует смещения по оси визирования «от себя» либо «на себя». Смещения в сторону выработанного пространства интерпретировались как смещения «на себя» и имеют знак минус. Поэтому для удобства анализа данных смещения по реперам и трещиномерам приведены в такой же вид, и имеют отрицательное смещение. К тому же, согласно ФНиП в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов», утвержденным приказом №439 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13.11.2020 г., в местах раскрытия трещин допустимо выполнять маркшейдерские наблюдения с линейными измерениями смещений и деформаций массива по линии максимального развития деформации [55].

В процессе мониторинга динамики развития трещины по забивным отражательным реперам в период с 12 октября по 18 ноября 2021 г. максимальное накопительное смещение по трещиномеру Тр5 составило –1344 мм. В период с 3 по 18 ноября замеры по данному трещиномеру не производились по причине уничтожения трещиномера. Максимальное накопительное смещение по трещиномеру Тр1

на 18 ноября составило -1088 мм. График накопительных смещений по трещиномерам Тр1, Тр2, Тр3, Тр4, Тр5 представлен на рисунке 55.

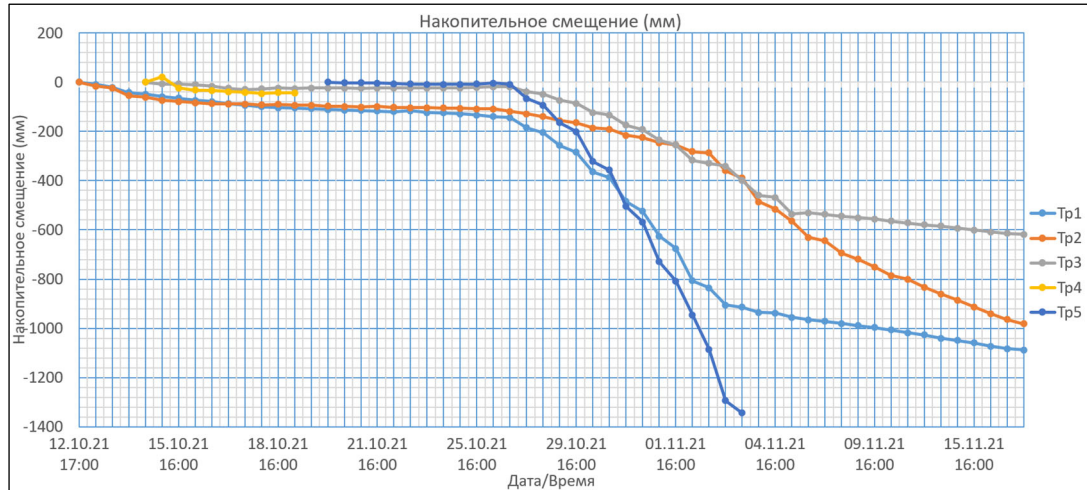


Рисунок 55 – График накопительного смещения по забивным трещиномерам Тр1, Тр2, Тр3, Тр4, Тр5

Максимальная скорость смещения по трещиномерам зафиксирована 02 ноября 2021 г. и составила $-17,5$ мм/ч по трещиномеру Тр5 и $-8,2$ мм/ч по Тр1 (рисунок 56).

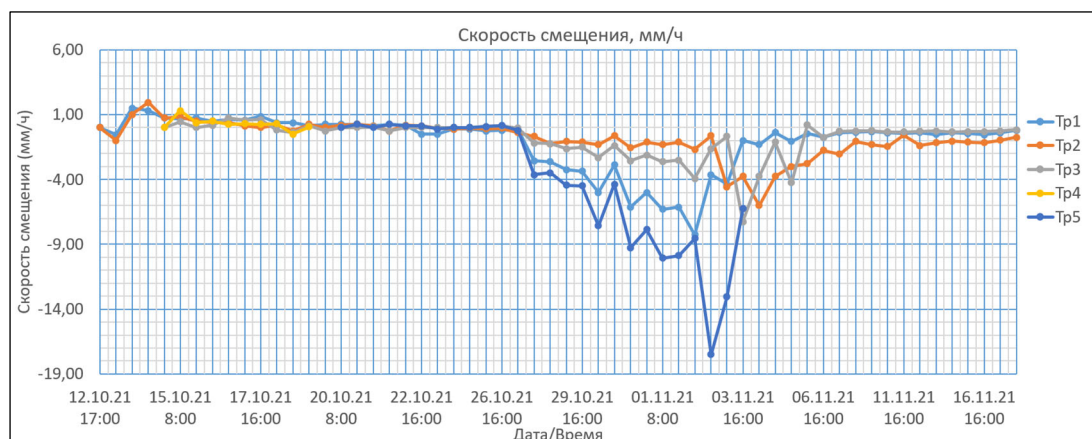


Рисунок 56 – График скорости смещения по забивным трещиномерам Тр1, Тр2, Тр3, Тр4, Тр5

При мониторинге трещины по реперам с отражательными призмами в автоматизированном режиме роботизированным тахеометром Leica TM50, с использова-

нием ПО Leica GeoMos с 12 октября по 3 ноября 2021 г. максимальное накопительное смещение составило -1157 мм по реперу s4 и -828 мм по реперу ТрЗап2 на 03.11.2021 г. Данные по накопительному продольному смещению по отражательным реперам ТрЗап1, ТрЗап2, s4 и ТрЗап3 представлены на рисунке 57.

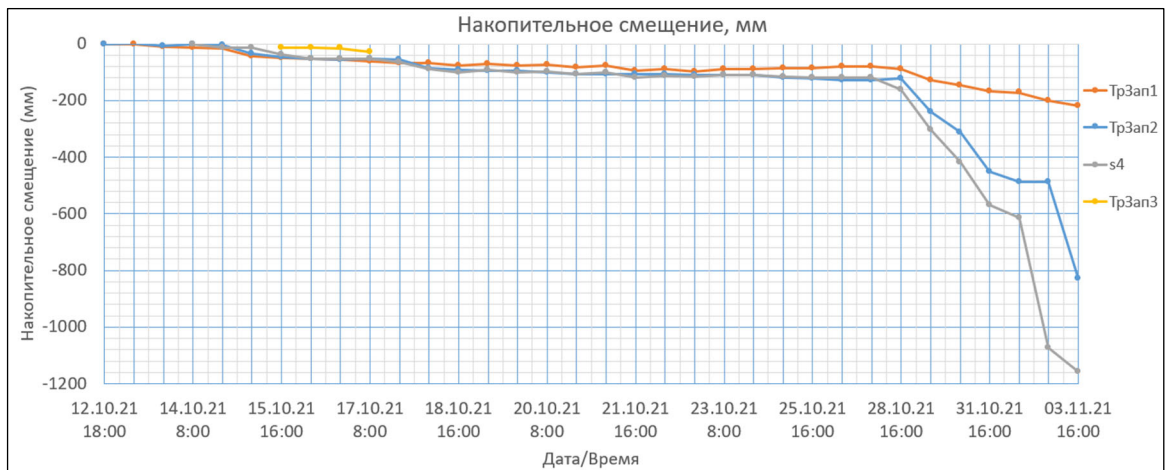


Рисунок 57 – График накопительного продольного смещения по отражательным реперам ТрЗап1, ТрЗап2, s4 и ТрЗап3

Максимальная скорость смещения по реперам с отражательными призмами зафиксирована 2 ноября 2021 г. по реперу s4 и составила $-19,1$ мм/ч, и по реперу ТрЗап2 и составила $-14,2$ мм/ч (рисунок 58).

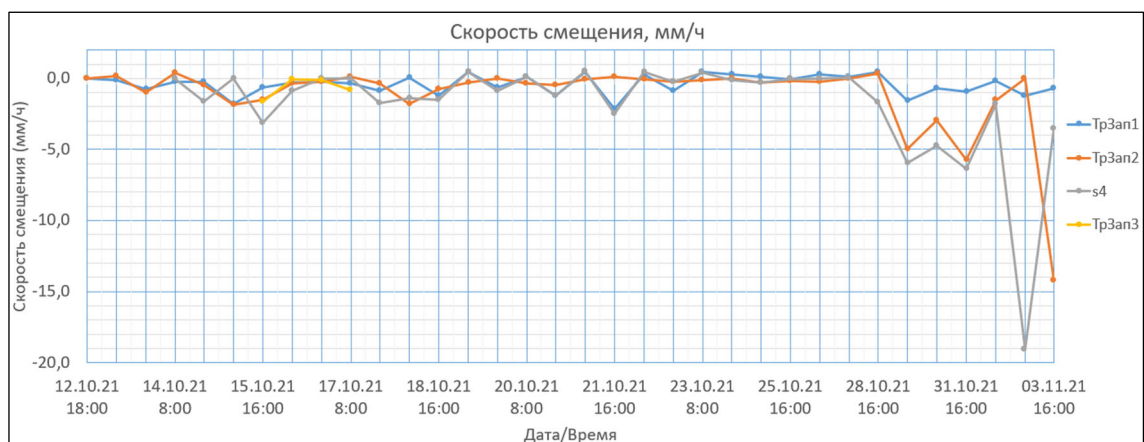


Рисунок 58 – График скорости смещения по отражательным реперам ТрЗап1, ТрЗап2, s4 и ТрЗап3

При мониторинге зоны деформации в районе трещины наземным интерферометрическим радаром Reutech MSR300 максимальное накопительное смещение по зоне составило $-1370,8$ мм. График накопительного смещения представлен на рисунке 59.

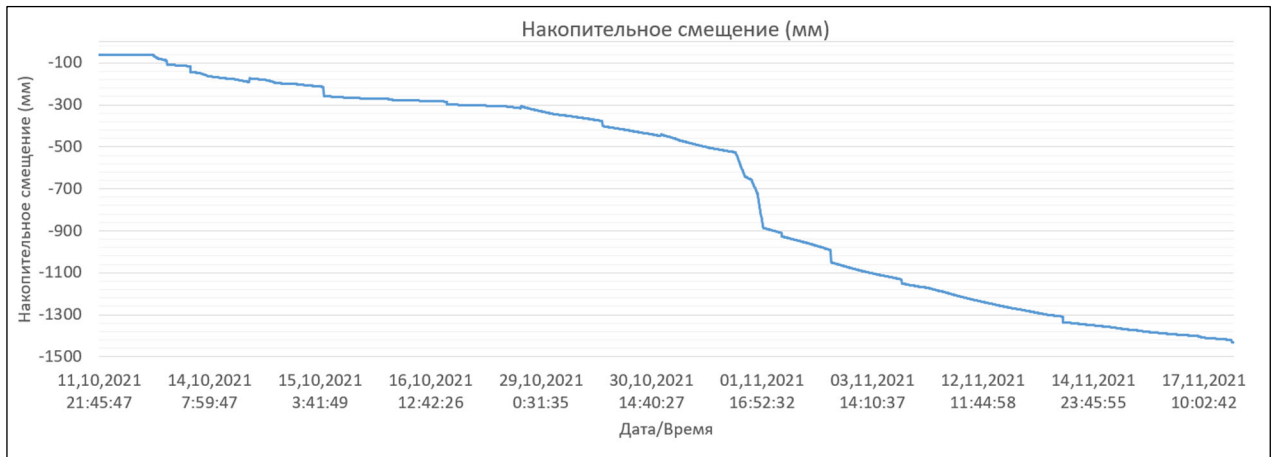


Рисунок 59 – График накопительного смещения по зоне радаром Reutech MSR300

Максимальная скорость смещения по зоне деформации зафиксирована 2 ноября 2021 г. и составила $-6,4$ мм/ч (рисунок 60).



Рисунок 60 – График скорости смещения по зоне радаром Reutech MSR300

Для наглядного представления данных о накопительных смещениях и скорости смещения, результаты мониторинга по трещиномерам, реперам и наземному интерферометрическому радару визуализированы на двух сводных графиках. На рисунке 61 представлены кривые накопленных смещений по всем применяемым методам контроля, что позволяет отследить общую динамику развития деформации и сопоставить абсолютные значения, полученные разными методами мониторинга.

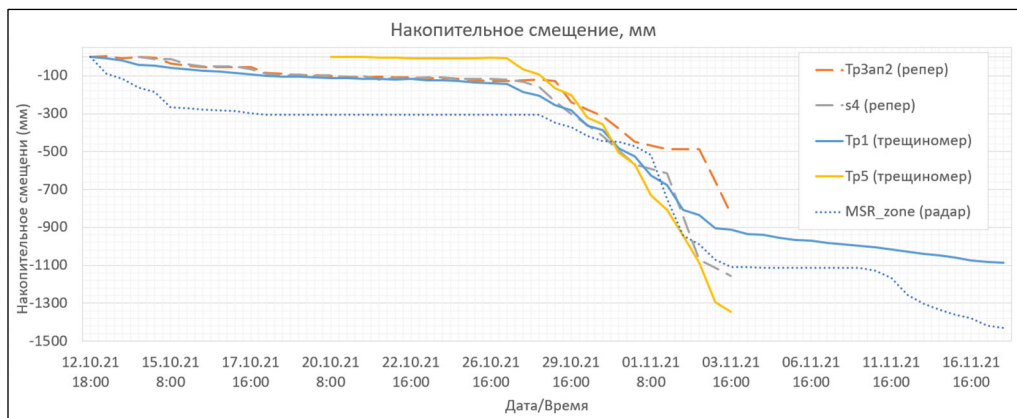


Рисунок 61 – График накопительного смещения по результатам сканирования радара, наблюдений по трещиномерам и реперам

На рисунке 62 отображены графики скоростей смещения, демонстрирующие изменение интенсивности деформационных процессов во времени.

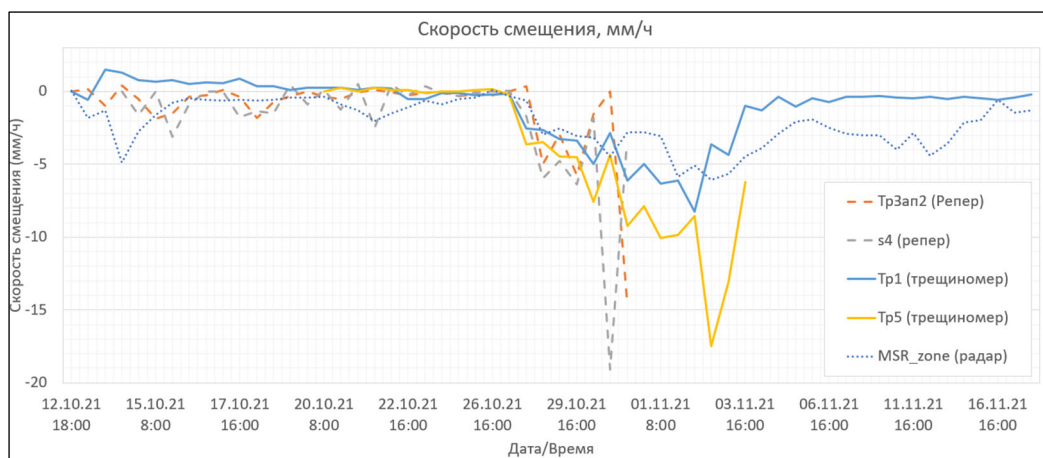


Рисунок 62 – График скорости смещения по результатам сканирования радара, наблюдений по трещиномерам и реперам

Сводные данные результатов мониторинга динамики развития деформации представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Сводные данные результатов мониторинга

	Трещиномеры		Отражатели		Радар MSR300	Разность
	Тр1	Тр5	ТрЗап2	S4		
Период наблюдения	12.10.2021 - 18.11.2021	12.10.2021 - 18.11.2021	12.10.2021 - 03.11.2021	12.10.2021 - 03.11.2021	12.10.2021 - 18.11.2021	
Накопительное смещение (мм)	-1088	-1344	-828	-1157	-1370,8	26,8 - 542,8 (мм)
Макс. скорость смещения (мм/ч)	-8,2	-17,5	-14,2	-19,1	-6,4	1,8 – 12,7 (мм/ч)
Дата макс. скорости	02.11.2021	02.11.2021	03.11.2021	30.10.2021	02.11.2021	

На основании данных в таблице 20, можно констатировать, что минимальная разница в накопительном смещении между различными методами мониторинга составляет 26,8 мм, что является достаточно высокой сходимостью между тремя анализируемыми методами. Значение максимальной разности в 542,8 мм не является ошибкой измерений, а обусловлено принципиально разной природой этих методов.

Данные с радаров показывают усредненное смещение по относительно большому по площади участку (около 100 м²). Показания радара интегрируют движение всей зоны, включая возможные деформации разного порядка внутри анализируемой зоны. Поэтому эти данные будут закономерно отличаться от точечных, которые фиксируют только максимальные значения смещений по реперам и трещиномерам.

Минимальная разница в скорости смещения горного массива между различными методами мониторинга составила 1,8 мм/ч, максимальная 12,7 мм/ч, что также обусловлено спецификой каждого метода мониторинга, как указывалось ранее.

В целом, анализ графиков, представленных на рисунках 55–62, позволяет сделать вывод о согласованности всех трех методов мониторинга. Это подтверждается синхронным характером увеличением накопительного смещения и скорости смещения, особенно с 28 октября по 3 ноября 2021 г.

В программном обеспечении IBM Statistics был проведен количественный анализ данных корреляции данных по смещению репера S4, трещиномера Tr5 и зоны сканирования радаром MSR300 в период с 28 октября по 03 ноября 2021 г. Выбор этого временного интервала обусловлен наличием данных по всем трем методам измерений за этот период, который характеризуется максимальным ускорением смещения. Полученные результаты представлены на рисунке 63.

Строка N указывает на количество исходных данных. В нашем случае анализировалось 14 значений, по два значения в сутки (в 8:00 и 16:00).

Интерпретация *p*-уровня (строка двустороннего значения) коэффициента корреляции производится следующим образом:

– если *p*-уровень $\leq 0,05$, то связь между переменными является статистически значимой;

– если *p*-уровень $> 0,05$, то связь между переменными является статистически не значимой [39].

По результатам интерпретации корреляционной матрицы Пирсона установлено, что все методы мониторинга демонстрируют значения коэффициентов корреляции ниже 0,05. Это позволяет сделать вывод о статистически значимой корреляции между рассматриваемыми методами.

		смещение_т рещиномер_ Tr_5	смещение_p епера_s4	смещение_p адар_MSR
смещение_трещиномер _Tr_5	Корреляция Пирсона	--		
	N	14		
смещение_репера_s4	Корреляция Пирсона	,987**	--	
	знач. (двусторонняя)	<,001		
	N	14	14	
смещение_радар_MSR	Корреляция Пирсона	,553*	,560*	--
	знач. (двусторонняя)	,040	,037	
	N	14	14	14

** . Корреляция значима на уровне 0,01 (двусторонняя).
* . Корреляция значима на уровне 0,05 (двусторонняя).

Рисунок 63 – Результаты количественного анализа корреляции данных репера S4, трещиномера Tr5 и MSR300

Представленные результаты наглядно демонстрируют эффективность комплексного подхода к мониторингу устойчивости бортов карьера, основанного на интеграции современных дистанционных и традиционных геодезических методов. Использование наземного радара Reutech MSR300 позволило зафиксировать начальную стадию развития деформации более чем за 48 часов до ее визуального обнаружения и проявлению трещины по полотну капитального съезда. Это обеспечило важный временной резерв для принятия превентивных мер безопасности.

В то же время каждый из проанализированных методов мониторинга имеет свои преимущества и недостатки. Метод наземного интерферометрического сканирования позволяет производить сканирование больших участков борта карьера, хорошо зарекомендовал себя при выявлении локальных зон сдвижения массива горных пород и не требует установки отражателей в потенциально опасной зоне. К недостаткам данного метода стоит отнести зависимость от прямой видимости и стабильности отражающей поверхности, а также ограниченную чувствительность к вертикальным смещениям. Данный метод хорошо подходит для масштабного мониторинга, выявления неустойчивых зон на бортах карьера, раннего обнаружения ускорения деформационных процессов, а также непрерывного сканирования больших площадей бортов карьера для оценки динамики деформационных процессов.

Автоматизированные тахеометры отличаются высокой точностью трехмерных векторов смещений, но имеют такие недостатки, как трудоемкость измерений на больших площадях, риск повреждения отражательных реперов и невысокую скорость получения данных. Данную технологию целесообразно использовать в качестве подтверждения критических смещений, зафиксированных радаром, а также для высокоточных измерений локальных участков.

Использование этих двух методов совместно позволяет минимизировать риски и повысить надежность и достоверность системы мониторинга за деформационными процессами. Для максимальной эффективности рекомендуется использовать оба метода в рамках единой системы управления рисками при разработке месторождений открытым способом.

3.4 Выводы по третьему разделу

В данном разделе изложена методика интерпретации данных сканирования наземных интерферометрических радаров и представлена разработанная автором алгоритмическая блок-схема. Данная схема предназначена для помощи инженерам-геомеханикам в принятии решений при срабатывании аварийных сигналов радарных систем мониторинга.

Рассмотрены примеры ложных срабатываний, предпосылки и причины их появления, проанализированы варианты распознавания ложных срабатываний и варианты коррекции влияния атмосферной рефракции на данные сканирования.

Рассмотрено влияние взрывных работ на качество горного массива. Приведена шкала оценки повреждения горного массива по данным сканирования наземных интерферометрических радаров в зависимости от времени стабилизации откоса.

Отдельно описана методика определения объемов вскрышных работ по данным сканирования интерферометрических радаров. Проведен сравнительный анализ точности определения объемов с результатами, полученными традиционными геодезическими методами.

Проведен сравнительный анализ данных сканирования деформации борта карьера интерферометрическим радаром с данными, полученными традиционными геодезическими методами.

Проведенные исследования подтвердили высокую эффективность наземного интерферометрического радиолокационного мониторинга для прогнозирования деформационных процессов в бортах карьеров. Установлена способность метода регистрировать начальные стадии смещения горного массива более чем за 48 часов до появления визуальных признаков разрушения. Статистический анализ демонстрирует удовлетворительную согласованность данных радарного сканирования с результатами традиционных инструментальных измерений. Разработанный двухуровневый подход к мониторингу, сочетающий различные методы контроля, поз-

воляет существенно повысить достоверность и оперативность оценки устойчивости откосов, что является важным фактором обеспечения безопасности горных работ. Полученные результаты обосновывают целесообразность внедрения комплексных систем мониторинга на горнодобывающих предприятиях.

4 РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДИК ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ НА ОБЪЕКТАХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ КОМПАНИЙ

4.1 Геотехнические риски при ложных срабатываниях радара

Управление геотехническими рисками является важной частью в построении эффективной системы мониторинга при обработке полезных ископаемых открытым способом. По данным Департамента Труда США (Mine Safety and Health Administration (MSHA), US Dept of Labor доля несчастных случаев со смертельным исходом по причине неустойчивости горного массива оценивается в 25 % от всех несчастных случаев со смертельным исходом [101].

Согласно исследованиям NIOSH (федеральная организация, отвечающая за проведение исследований о несчастных случаях на производстве), в США за период 2010–2019 гг., обрушения горной массы привели к 46 смертельным случаям, 33 случаям инвалидности и 3 082 травмам [91].

Непрогнозируемые деформации, а также ложные срабатывания радаров могут привести к многомиллионным затратам в связи с повреждением или простоем оборудования.

В период с 01.05.2023 по 31.12.2023 была проведен анализ срабатываний одного из радаров. За этот период было зафиксировано 83 срабатывания, из которых 54 предупреждения носили характер сигнализации аппаратного обеспечения радара, указывающие на неисправность или ошибки в работе самого радара, а 29 срабатываний были интерпретированы как геотехнические предупреждения, свидетельствующие о потенциальных изменениях состоянии горного массива. Распределение зафиксированных предупреждений представлено на рисунке 64.

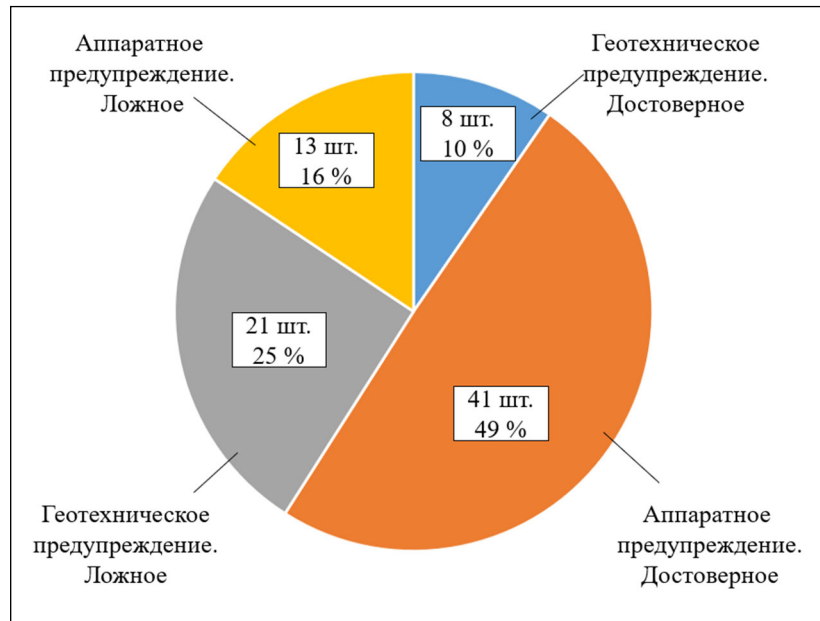


Рисунок 64 – Результаты сигнализации радара в период с 01.05.2023 по 31.12.2023

Анализ данных показал, что 41 % от всех зарегистрированных срабатываний является ложным, В данном контексте «ложные сигналы» – это не оказывающие влияние на корректную работу радара в случае аппаратных предупреждений и не подтвердившихся в случае геотехнических предупреждений. Основными причинами ложных срабатываний является совокупность метеорологических и гидрогеологических факторов, характерных для открытой разработки месторождений в северных регионах России, а также помех, вызванными работой техники в карьере.

Отбраковка ложных геотехнических предупреждений является важной задачей, поскольку вынужденная остановка добычных работ напрямую влияет на экономические показатели предприятия. Например, часовой простой экскаватора WK-20 совместно с автосамосвалом Caterpillar 793D на золоторудном карьере может обходиться компании до 2 млн рублей потерь, не считая простоя буровых станков и вспомогательной техники. Поэтому выявление причин и фильтрация ложных сигналов при интерферометрическом сканировании способствует повышению экономической эффективности горного производства [1].

Предложенная ранее в данной работе схема интерпретации и отбраковки ложных срабатываний позволяет снизить экономические затраты в связи с минимизацией простоя горного оборудования.

4.2 Определение пороговых значений скорости и смещений для радаров на объектах горных работ, ведущих разработку открытым способом в условиях низких температур

В настоящее время для российских инженеров-геомехаников и специалистов в области геодезического мониторинга не существует разработанного и утвержденного стандарта реагирования в случае развития деформационных процессов массивов горных пород на карьерах, с использованием наземных интерферометрических радаров. Это обусловлено относительно низким уровнем внедрения технологии наземного интерферометрического сканирования на объектах отечественных горнодобывающих компаний. При срабатывании сигналов о превышении пороговых значений скорости или смещений, настроенных для конкретных зон, а также при фиксации тенденции к ускорению деформаций, у специалистов часто отсутствует стратегия использования данных сканирования для реагирования в реальном времени и анализа времени обрушения [4]. В большинстве случаев пороговые значения для радаров принимаются произвольно или по обобщённым рекомендациям, без анализа специфики конкретного карьера, что снижает эффективность заблаговременного обнаружения потенциально нестабильных участков.

Наземные интерферометрические радары предоставляют данные сканирования в виде облака точек (пикселей). Периодичность обновления данных варьируется от нескольких десятков секунд до нескольких десятков минут, в зависимости от типа и модели радара. Такой режим работы дает специалисту, осуществляющему геодезический мониторинг и анализ данных сканирования, возможность выявлять сдвиги поверхности склона в пределах области сканирования и его изменение за фиксированный временной интервал.

Исследования точности интерферометрического радара GroundProbe SSR-XT были проведены автором, совместно с Горилько А. С. [77]. Полученные результаты представлены в таблице 21.

Таблица 21 – Результаты исследований точности сканирования радара GroundProbe SSR-XT

Смещение отражателя по микрометру (мм)	Значения в ПО SSR Viewer	Смещение отражателя по результатам сканирования SSR-XT (мм)	Δ (мм)
0	-0,676	0	
+7,5	+6,452	+7,128	-0,372
-7,5	-0,868	-7,320	-0,180
+7,5	+6,685	+7,553	+0,053
-7,5	-0,629	-7,314	-0,186
+2	+1,773	+2,402	+0,402
-2	-0,118	-1,891	-0,109
+2	+2,103	+2,221	+0,221
-2	+0,143	-1,960	-0,040
+0,5	+0,757	+0,614	+0,114
-0,5	+0,354	-0,403	-0,097
+0,5	+1,083	+0,729	+0,229
-0,5	+0,603	-0,480	-0,103
		Средняя накопительная погрешность (СНП)	2,780

Опытным путем была установлена средняя накопительная погрешность измерений сдвижения уголкового отражателя на дистанции 1 км, которая составила 2,78 мм. Данная формула позволяет производить расчет усредненной точности измерения радарным комплексом в следующем виде:

$$СНП/N=UT, \quad (20)$$

где СНП – средняя накопительная погрешность, полученная в результате измерений;
N – количество измерений.

Итого усредненная точность сканирования радара GroundProbe SSR-XT составила 0,231 мм на 1 км в условиях горнорудного предприятия.

В данном разделе выполнен анализ определения пороговых значений скорости деформаций горного массива, при котором происходят деформации.

Для анализа были использованы данные сканирования радаром Reutech MSR300 и GroundProbe SSR-XT.

В таблице 22 представлены сводные данные по деформациям, зафиксированным наземными интерферометрическими радарными на нескольких карьерах – аналогах, по которым проводились статистические расчеты.

Таблица 22 – Сводные данные анализируемых деформаций

Номер деформации	Дата	Радар	Смещение за 12 ч (мм)	Скорость (мм/ч)	Объем (м ³)	GSI	Тип деформации
Деф 1	08.04.2020	GroundProbe SSR-XT	79,5	10,1	17 000	64	клиновидная
Деф 2	28.04.2020	Reutech MSR300	122	14	18 000	64	клиновидная
Деф 3	15.02.2022	Reutech MSR300	29	3,9	300	58	плоский сдвиг
Деф 4	08.03.2022	Reutech MSR300	69	8,1	69 000	58	плоский сдвиг
Деф 5	06.04.2022	GroundProbe SSR-XT	90	8	2 700	44	клиновидная
Деф 6	18.05.2022	Reutech MSR300	33	2,5	630	44	клиновидная
Деф 7	27.05.2022	Reutech MSR300	60	7,07	26 300	44	клиновидная
Деф 8	26.06.2022	GroundProbe SSR-XT	42	18	900	44	плоский сдвиг
Деф 9	28.08.2022	Reutech MSR300	53	1,9	6 500	60	клиновидная
Деф 10	04.12.2022	Reutech MSR300	123	24	2 500	60	плоский сдвиг
Деф 11	19.07.2023	Reutech MSR300	345	32,4	7 200	44	клиновидная
Деф 12	24.11.2024	Reutech MSR300	37	7,7	1 400	63	клиновидная
Деф 13	18.06.2024	Reutech MSR300	84	11,5	27 000	63	плоский сдвиг
Деф 14	02.10.2024	Reutech MSR300	70	12,5	56 000	52	опрокид
Деф 15	25.10.2024	Reutech MSR300	100	18	60 400	52	опрокид
Деф 16	29.10.2024	Reutech MSR300	66	4,5	24000	52	опрокид
Деф 17	16.04.2024	Reutech MSR300	17	5,5	200	72	плоский сдвиг

По результатам таблицы 20 построена гистограмма распределения частоты деформаций в зависимости от скорости смещения с шагом интервала 2,5 мм/ч (рисунок 65). На гистограмме видно, что первый пик приходится на диапазон скоростей 2,5–5 мм/ч, а наибольшая частота деформаций наблюдается в интервалах 2,5–5 и 7,5–12,5 мм/ч. При этом в отмеченных диапазонах фиксируются наиболее крупные по объему деформации, неконтролируемое развитие которых может привести к серьезным рискам, таким как травмы, потеря оборудования и летальный исход.

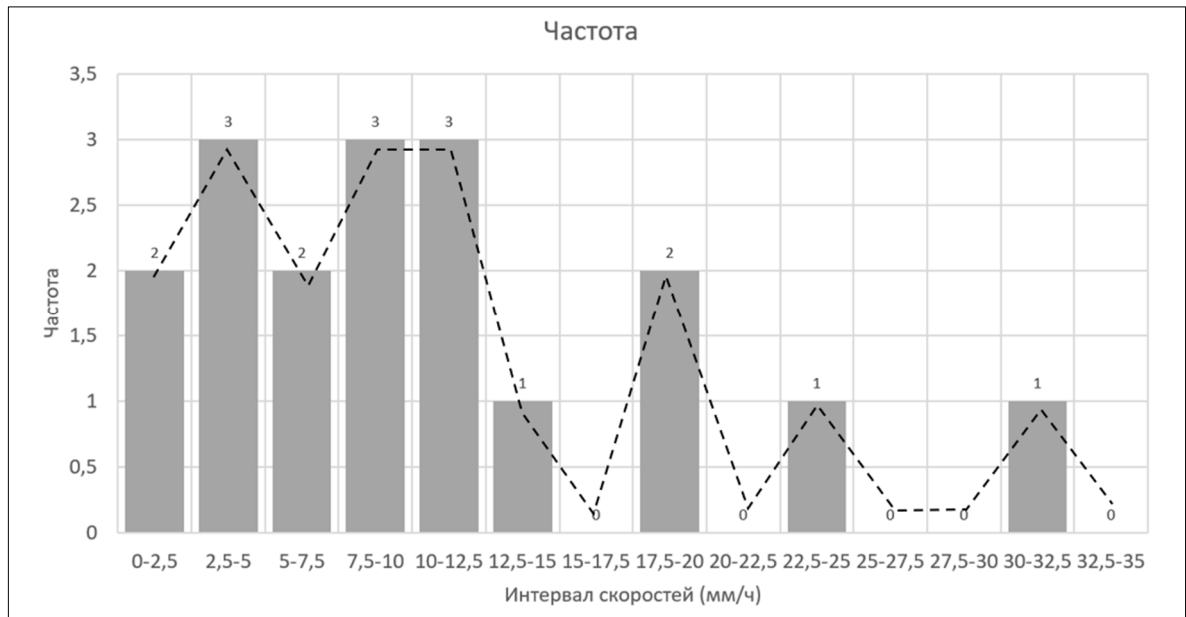


Рисунок 65 – Интервальная гистограмма распределения частоты деформаций в зависимости от скорости смещения

Представленные данные носят оценочный характер и в значительной степени зависят от конкретного набора данных наблюдений, типа горных пород, конфигурации откоса, но при этом анализ позволяет выявить важную закономерность: превышение скорости 5 мм/ч в большинстве случаев ведет к обрушению массива горных пород. Для большинства зафиксированных деформаций именно этот порог можно считать маркером перехода от устойчивого (или условно устойчивого) состояния к активной фазе деформирования пород.

Это же подтверждается и в исследованиях от группы инженеров-геотехников из компании GroundProbe, которые анализируют данные с радаров с помощью удаленного доступа [79]. Критерии предельных смещений горного массива определяются геотехнической или маркшейдерской службами предприятия для каждого месторождения индивидуально и зависят от таких факторов, как литология, наличие поверхностей ослаблений, физико-механические свойства горных пород, наличие грунтовых вод и т. д. Затем они корректируются, на основании базы данных ранее зафиксированных деформаций [109, 20].

Например, в работе [60] автор обосновывает критическую скорость в 2–3 мм/ч для карьера «Железный» (Ковдорское месторождение), в зависимости от характера деформационных процессов.

В таблице 23 представлены данные анализа 304 случаев деформаций для скальных пород, зарегистрированных в различных странах.

Таблица 23 – Таблица скоростей при обрушении скальных пород

Диапазон скоростей (мм/ч)	Трещиноватая порода	Твердая порода	Итого
02-03	–	11	11
03-04	1	4	5
04-05	–	3	3
05-10	3	54	57
10-15	4	51	55
15-20	1	32	33
20-30	8	44	52
30-50	9	51	60
50-100	10	14	24
больше 100	1	3	4
Итого	37	267	304

Анализируя данные таблицы 21, можно сделать вывод, что 285 вывалов из 304 произошли при скорости более 5 мм/ч, что составляет 93,75 %. Выставление критического порога скорости в 5 мм/ч и геотехнического в 2,5 мм/ч является рекомендательным как в «Методических указаниях по оценке рисков развития деформаций» [79], так и от производителей большинства моделей радаров. Однако при установке геотехнического и критического порогов скорости необходимо учитывать геолого-структурные особенности конкретного карьера для определения критериев безопасного ведения горных работ.

4.3 Разработка матрицы реагирования при радарном мониторинге

На основе анализа зафиксированных радаром случаев обрушений на карьерах российских компаний (см. таблицу 20), а также опираясь на опыт создания матриц реагирования зарубежных исследователей, была разработана матрица реагирования при наземном интерферометрическом сканировании [110].

На основании данных, представленных в таблице 20, была сформирована корреляционная матрица Спирмена (рисунок 66), для четырех количественных переменных: смещения, скорости, объема и геологического индекса прочности (GSI). Выбор в пользу матрицы Спирмена основывался на том, что данный метод основывается на ранговой корреляции, в отличие от матрицы Пирсона (линейная корреляция), что дает возможность анализировать ограниченное количество исходных данных и учитывать разброс их значений.

Корреляционный анализ, проведенный с использованием коэффициентов корреляции, позволил проверить множество гипотез о связях между указанными переменными. Статистическая обработка данных осуществлялась с применением программного обеспечения IBM SPSS Statistics 27.

Ро Спирмена		Смещение	Скорость	Объем	GSI
Смещение	Кoeffициент корреляции	--			
	знач. (двухсторонняя)	.			
	N	17			
Скорость	Кoeffициент корреляции	.761**	--		
	знач. (двухсторонняя)	<.001	.		
	N	17	17		
Объем	Кoeffициент корреляции	.544*	.329	--	
	знач. (двухсторонняя)	.024	.198	.	
	N	17	17	17	
GSI	Кoeffициент корреляции	-.061	-.067	-.069	--
	знач. (двухсторонняя)	.816	.797	.794	.
	N	17	17	17	17

** Корреляция значима на уровне 0,01 (двухсторонняя).
* Корреляция значима на уровне 0,05 (двухсторонняя).

Рисунок 66 – Корреляционная матрица Спирмена

В ПО IBM SPSS производится расчет корреляции по принципу «все со всеми». Это означает, что каждая переменная коррелируется со всеми остальными переменными, и в результате корреляционная матрица включает все возможные парные корреляции. На главной диагонали матрицы присутствует значение единицы, что отражает корреляцию переменной с самой собой. Диагональные элементы корреляционной матрицы не подлежат дальнейшему анализу, так как они представляют собой тавтологические корреляции, не несущие значимой информации о взаимосвязи между переменными. В контексте анализа данных, строка N обозначает количество исходных наблюдений.

В данном исследовании рассматривалось семнадцать деформаций. Интерпретация коэффициента корреляции основывается на степени силы связи между переменными:

- $r > 0,01 \leq 0,29$ – слабая положительная связь,
- $r > 0,30 \leq 0,69$ – умеренная положительная связь,
- $r > 0,70 \leq 1,00$ – сильная положительная связь,
- $r > -0,01 \leq -0,29$ – слабая отрицательная связь,
- $r > -0,30 \leq -0,69$ – умеренная отрицательная связь,
- $r > -0,70 \leq -1,00$ – сильная отрицательная связь.

Положительная связь свидетельствует о прямой зависимости, когда увеличение одного значения в паре приводит к увеличению другого.

Отрицательная связь свидетельствует об обратной зависимости, когда увеличение одного значения в паре приводит к уменьшению другого.

Интерпретация р-уровня, строка двустороннего значения, коэффициента корреляции производится следующим образом:

- если р-уровень $\leq 0,05$, то связь между переменными является статистически значимой;
- если р-уровень $> 0,05$, то связь между переменными является статистически не значимой [39].

Анализ корреляционной матрицы Спирмена выявил следующие закономерности.

Объем и смещение: наблюдается умеренная положительная статистически значимая корреляция между этими переменными ($r = 0,544$, находится в диапазоне $r > 0,30 \leq 0,69$, p -уровень = $0,024$, что меньше значения $0,05$).

Смещение и скорость: выявлена сильная положительная высоко статистически значимая корреляция между смещением и скоростью ($r = 0,761$, находится в диапазоне $r > 0,70 \leq 1,69$, p -уровень $< 0,001$, что меньше значения $0,05$).

Смещение/скорость/объем и GSI – выявлена статистически не значимая, сильная отрицательная связь.

В соответствии с информацией, представленной на рисунке 66, были построены диаграммы рассеяния для следующих параметров: объём, тип деформаций и геологический индекс прочности (GSI). На указанных графиках пунктирная линия представляет собой аппроксимирующую функцию, а сплошная линия — доверительные интервалы.

На рисунке 67 представлена диаграмма рассеяния, иллюстрирующая зависимость объема деформаций от скорости и смещения.

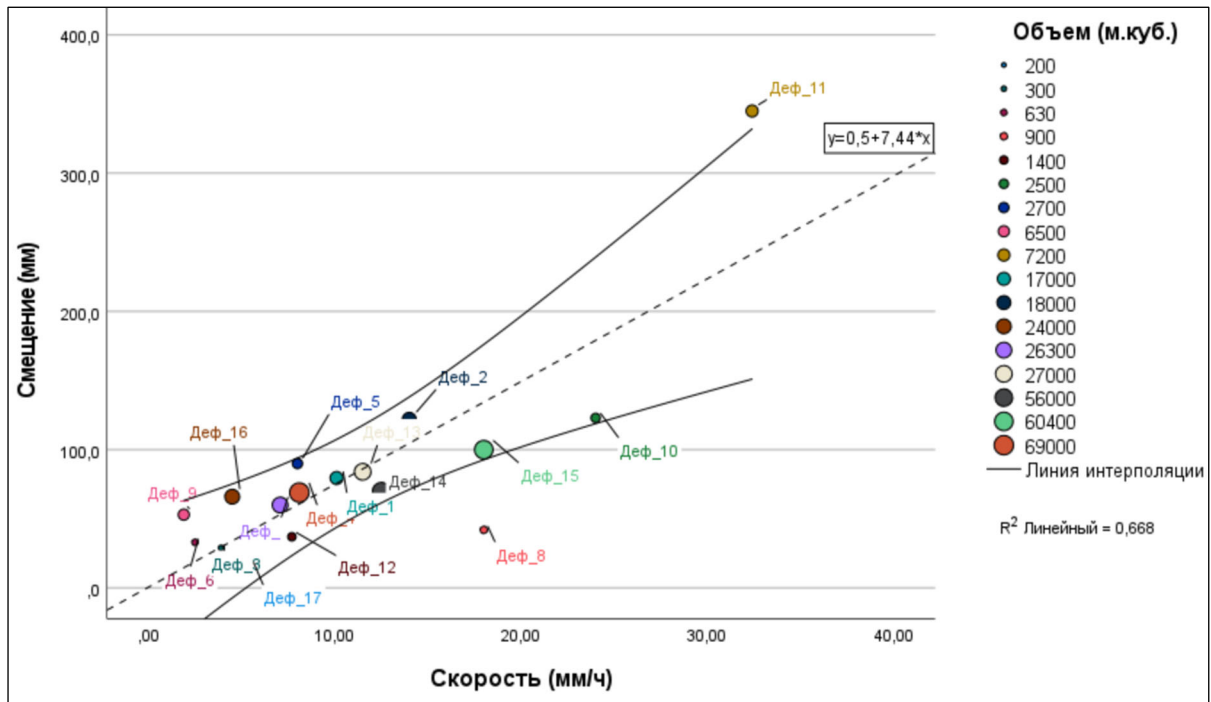


Рисунок 67 – Диаграмма рассеяния объема деформации в зависимости от скорости и смещения

Анализ диаграммы позволяет выявить следующую закономерность: деформации значительного объема (17 тыс. м³ и более) демонстрируют высокую устойчивость к высоким скоростям и смещениям. В тоже время деформации меньшего объема (менее 17 тыс. м³) характеризуются более низкой устойчивостью к аналогичным параметрам.

Практические наблюдения подтверждают, что деформации объемом до 100 м³, как правило, не приводят к серьезным последствиям и длительным простоям оборуования, при условии, что оборудование и персонал не пострадали.

На основании анализа диаграммы рассеяния типа деформаций (рисунок 68) можно сделать вывод, что наименьшим запасом устойчивости обладают малые (объемом от 200 м³) и средние (до 1 500 м³) деформации, имеющие тип клиновидных и плоского сдвига. Это подтверждается тем, что деформации данного типа в скальных породах, подобно камнепадам, могут развиваться с короткой фазой ускорения перед обрушением, сохраняя при этом относительно низкие скорости движения горного массива.

В то же время, все анализируемые типы деформаций значительного объема (от 15 тыс. м³ и более) демонстрируют наибольшее смещение среди всех анализируемых данных. Однако следует учитывать возможность погрешностей в наблюдениях, которые могут повлиять на точность полученных результатов.

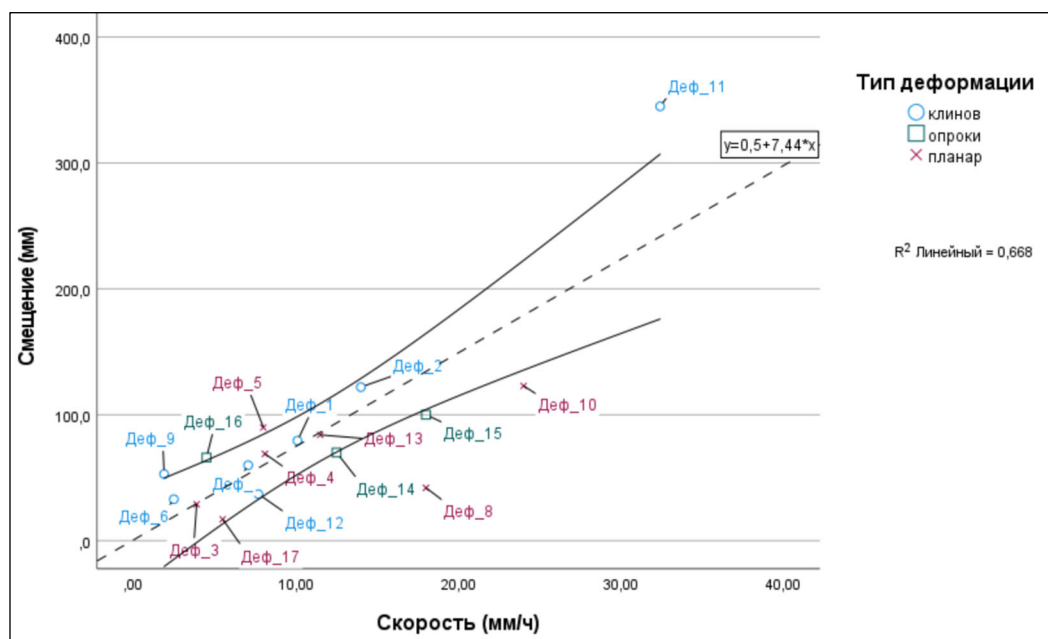


Рисунок 68 – Диаграмма рассеяния типа деформации в зависимости от скорости и смещения

Анализ диаграммы рассеяния, отражающий зависимость GSI от скорости и смещения (рисунок 69) демонстрирует корреляцию между характеристиками горного массива и одного из параметров, при котором развивается деформация. При меньших значениях объема деформации и GSI наблюдаются меньшие значения скорости и смещения в момент обрушения. В то же время, прочные породы с высоким объемом деформации демонстрируют способность выдерживать более значительные скорости и смещения без разрушения.

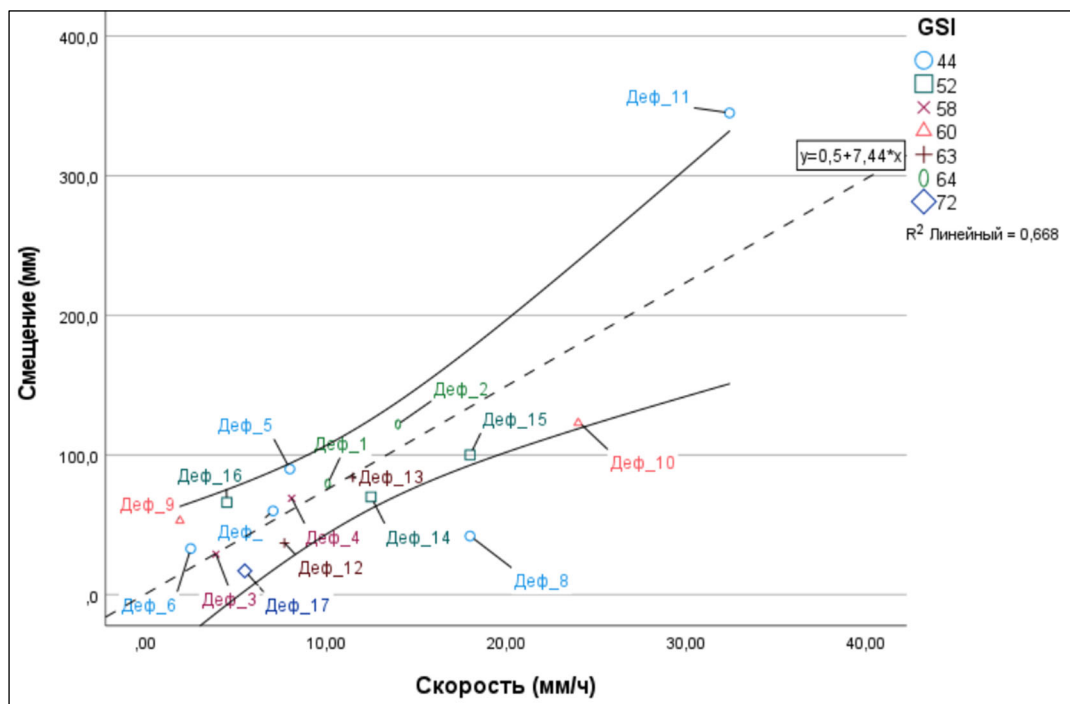


Рисунок 69 – Диаграмма рассеяния GSI в зависимости от скорости и смещения

К тому же согласно анализу таблицы сопряженности скорости развития деформации и GSI (рисунок 70), существует прямая связь между значениями GSI и частотой возникновения деформаций в слабых породах. При уменьшении GSI (ухудшении качества горного массива) наблюдается увеличение количества деформаций, независимо от их объема.

Выявленная зависимость является абсолютно логичной и предсказуемой с позиции механики горных пород. Она подтверждает, что нарушенный массив (низкий

GSI) ведет себя как структурно неустойчивая среда, где любое нагружение с высокой вероятностью вызывает деформацию, в то время как прочный массив (высокий GSI) способен воспринимать большие нагрузки. Полученные данные полностью согласуются с физической моделью поведения горных пород [85].

Таблица сопряженности Скорость * GSI

Количество

		GSI							
		44	52	58	60	63	64	72	Всего
Скорость	1,90	0	0	0	1	0	0	0	1
	2,50	1	0	0	0	0	0	0	1
	3,90	0	0	1	0	0	0	0	1
	4,50	0	1	0	0	0	0	0	1
	5,50	0	0	0	0	0	0	1	1
	7,07	1	0	0	0	0	0	0	1
	7,70	0	0	0	0	1	0	0	1
	8,00	1	0	0	0	0	0	0	1
	8,10	0	0	1	0	0	0	0	1
	10,10	0	0	0	0	0	1	0	1
	11,50	0	0	0	0	1	0	0	1
	12,50	0	1	0	0	0	0	0	1
	14,00	0	0	0	0	0	1	0	1
	18,00	1	1	0	0	0	0	0	2
	24,00	0	0	0	1	0	0	0	1
32,40	1	0	0	0	0	0	0	1	
Всего		5	3	2	2	2	2	1	17

Рисунок 70 – Таблица сопряженности скорости развития деформаций и GSI

На основе выполненных исследований, статистического анализа, логарифмических графиков, была разработана матрица реагирования при радарном мониторинге для исследуемого карьера (таблица 24).

Корреляционный анализ указывает на то, что скорость сама по себе не является надежным признаком масштаба обрушения.

Существующая практика, когда матрицы реагирования строятся преимущественно на основе скорости деформации, не являются оптимальными, и могут приводить к серьезным ошибкам в оценке рисков. Основываясь на данных статистиче-

ских расчетов, можно сделать вывод о том, что скорость деформации не коррелирует с объемом (p -уровень = 0,198, что больше 0,05). Это также видно из данных таблицы 20. Деформации «Деф_8» и «Деф_15» имеют одинаковую максимальную скорость, 18 мм/ч, однако объем обрушения различается практически в 67 раз.

При ориентировании только на скорость деформации существуют следующие риски.

1 Ложная тревога: высокая скорость, но малый объем деформации. Приводят к необоснованным остановкам работ и, как следствие, к экономическим потерям.

2 Пропуск возможного обрушения: небольшая скорость, но катастрофический объем (50 000 м³ и более) что может привести к угрозе безопасного ведения горных работ.

Таким образом, в процессе разработки матрицы реагирования были выбраны две ключевые переменные – скорость смещения деформации (оперативный параметр) и объем предполагаемого вывала (прогнозный параметр).

Матрица имеет «зеленый», «желтый», «оранжевый», «красный» и «черный» триггерные уровни. К каждому из триггеров добавлен уровень риска, действия геомеханика и лист оповещения.

Международным сообществом геомехаников признано, что подобную матрицу реагирования необходимо внедрять на каждое месторождение, на котором ведется комплексный мониторинг, и адаптировать к условиям конкретных карьеров [84]. Наиболее эффективным методом калибровки матрицы является анализ результатов мониторинга уже случившихся деформаций. В случае отсутствия этих данных, разработка матрицы может быть затруднена. Применение средних значений, может решить эту проблему, однако в некоторых случаях в результате геолого-структурных особенностей того или иного карьера эффективность матрицы может быть снижена.

Таблица 24 – Матрица реагирования при радарном мониторинге

		Объем предполагаемого вывала (м ³)	Скорость смещения (мм/ч)				
			От 0 до 1	От 1 до 3	От 3 до 5	От 5 до 10	≥ 10
Размер деформации	Катастрофический	50 000 и более	15	19	22	24	25
	Большой	5 000–50 000	10	14	18	21	23
	Средний	50–5 000	6	9	13	17	20
	Маленький	5–50	3	5	8	12	16
	Незначительный	0,5–5	1	2	4	7	11

Баллы	Уровень риска	Действия геомеханика	Лист оповещения
23-25	Чрезвычайная ситуация. Обрушение неизбежно	Обрушение неизбежно произойдет. Инициировать процедуру эвакуации людей и техники. Время обрушения около 12 ч	Главный геотехник, начальник управления горного производства, начальник карьера, горный диспетчер, Главный инженер ГОК, Операционный директор ГОК
17-22	Высокий риск обрушения	Запрет нахождения техники и людей в опасной зоне. Возобновление работ только при переходе к среднему риску обрушения	Главный геотехник, начальник управления горного производства, начальник карьера, горный диспетчер, Главный инженер ГОК, Операционный директор ГОК
12-16	Средний риск обрушения	Ограничить нахождение людей и техники, не связанных с ведением горных работ. Рассылка презентации опасной зоны, запись в журнал контроля за состоянием уступов и откосов	Главный геотехник, начальник управления горного производства, начальник карьера, горный диспетчер
7-11	Умеренный риск	Локализация потенциально опасной зоны. Повышенное внимание к зоне. Рассылка презентации опасной зоны	Главный геотехник, Старший инженер-геомеханик, мастер горных работ
1-6	Низкий риск обрушения	Продолжать текущий мониторинг карьера. Визуальный осмотр нестабильного участка	Главный геотехник, Старший инженер-геомеханик

4.4 Выводы по четвертому разделу

Проведенный анализ данных наземного интерферометрического радара показал, что 41 % зарегистрированных срабатываний являются ложными. Эти события обусловлены комплексом природных (метеорологические и гидрогеологические условия северных регионов) и техногенных (помехи от работы карьерной техники) факторов. Их

наличие создает существенные экономические риски, поскольку остановка ключевого оборудования (например, экскаваторов и автосамосвалов) при ложных срабатываниях приводит к прямым убыткам, оцениваемым в сотни и даже миллионы рублей.

В этой связи задача достоверной и оперативной отбраковки ложных предупреждений приобретает критическую важность для обеспечения рентабельности горного производства. Разработанная и предложенная в рамках настоящего исследования методика интерпретации и фильтрации сигналов направлена на решение данной проблемы. Ее внедрение позволяет минимизировать количество необоснованных остановок технологического процесса, тем самым существенно повышая экономическую эффективность ведения горных работ. Таким образом, реализация данной схемы представляет собой практический инструмент снижения операционных затрат и увеличения производительности горных предприятий.

На основании базы данных сканирования радаров Reutech MSR300 и GroundProbe SSR-FX определены пороговые скорости, превышения которых в большинстве случаев являются сигналом активно развивающихся деформационных процессов в массиве горных пород.

По результатам анализа обоснована разработка адаптированных матриц реагирования для наземного интерферометрического мониторинга деформационных процессов на карьерах. Статистический анализ семнадцати зафиксированных случаев обрушений выявил наличие сильной положительной корреляции между ключевыми параметрами: объемом деформации, скоростью смещения и величиной смещения. Установлено, что характеристики горного массива (GSI) оказывают существенное влияние на характер развития деформаций.

На основе выявленных закономерностей разработана пятиуровневая матрица реагирования, интегрирующая два наиболее значимых и коррелирующих параметра — скорость смещения и объем потенциального вывала. Предложенная матрица предусматривает четкую регламентацию действий оперативного персонала в зависимости от уровня риска, что позволяет формализовать процесс принятия решений при мониторинге устойчивости бортов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в процессе работы исследования позволили достичь поставленных целей за счет комплексного анализа данных о смещении, полученных по результатам сканирования наземных интерферометрических радаров. Главным образом цели были направлены на дальнейшее эффективное использование преимуществ наземных радаров на карьерах отечественных компаний и повышение уверенности инженеров, выполняющих мониторинг бортов и откосов карьеров, отвалов, в принятии решений при анализе данных интерферометрического сканирования.

В результате теоретических и экспериментальных исследований автором получены следующие результаты и выводы:

- выполнен анализ научно-технических разработок в области современных методов геодезического мониторинга на открытых горных работах в российской и зарубежной практике, что позволило определить существующую проблематику и сформулировать цель и задачи диссертационного исследования;

- исследована применяемая на карьерах российских компаний традиционная система геодезического мониторинга и выявлены ее недостатки. Дана качественная оценка дистанционных методов определения деформаций бортов и уступов карьеров, отвалов, в условиях низких температур. Проведено совершенствование, путем внедрения интерферометрических радаров как базового инструмента при наблюдениях за смещениями горного массива;

- выполнен анализ эффективности применения наземного интерферометрического сканирования на объектах открытых горных работ;

- разработана пятиуровневая матрица реагирования при радарном мониторинге, интегрирующая параметры скорости смещения и объема потенциального вывала. Матрица предусматривает четкую регламентацию действий оперативного персонала в зависимости от уровня риска, что позволяет формализовать процесс принятия решений при мониторинге устойчивости бортов;

– результаты научной работы апробированы и внедрены в производственный процесс АО «Полюс Красноярск», о чем свидетельствует акт внедрения (Приложение А).

Результаты исследования рекомендуются к использованию отечественными горнодобывающими предприятиями как научно обоснованный инструмент для повышения эффективности системы геодезического мониторинга и безопасности ведения горных работ.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в накоплении и статистическом анализе данных с целью уточнения пороговых значений матрицы реагирования при радарном мониторинге для различных горно-геологических условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ данных сканирования наземных интерферометрических радаров на объектах открытых горных работ для выявления ложных сигналов / А. А. Шоломицкий, Г. А. Уставич, В. А. Шаворин, Е. В. Ситникова // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 2. – С. 61–73. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-2-61-73.
2. Бесимбаева, О. Г. Мониторинг деформаций земной поверхности на обрабатываемых территориях / О. Г. Бесимбаева, Г. А. Уставич, Е. А. Олейникова. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 1. – С. 82–91.
3. Богданец, Е. С. Изучение процессов деформаций с использованием автоматизированной системы мониторинга / Е. С. Богданец, О. О. Черемухина. – Текст : непосредственный // Masters journal. – 2014. – № 1. – С. 82–90.
4. Бурцев, С. В. Радиолокационные системы контроля устойчивости бортов на разрезе «Черниговец» / Бурцев С. В., Рыбак Л. В. – Текст : непосредственный // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2018. – № 1. – С. 203–209.
5. Галустьян, Э. Л. Геомеханика открытых горных работ / Э. Л. Галустьян. – М. : Недра, 1992. – 272 с. Текст : непосредственный.
6. Гальперин, А. М. Геомеханика открытых горных работ / А. М. Гальперин. – М. : Издательство Московского государственного горного университета; 2003. – Текст : непосредственный.
7. Гальперин, А. М. Геомеханика открытых горных работ / А. М. Гальперин. – М. : МГГУ, 2003 г. – 473 с. – Текст : непосредственный.
8. Гатилов, М. А. Проект маркшейдерских работ по наблюдению за осадками обогатительной фабрики № 2 ОАО «Комбинат КМАруда» : выпускная квалификационная работа / М. А. Гатилов. – Белгород : НИУ «БелГУ», 2019. – 84 с. – Текст : непосредственный.

9. Геоинформационная система геомеханического мониторинга рудных месторождений с использованием методов космической радиолокационной интерферометрии / Ж. Т. Кожаев, М. А. Мухамедгалиева, М. Г. Мустафин, Б. Б. Имансакипова // Горный журнал. – 2017. – № 2. – С. 39–44. DOI: 10.17580/gzh.2017.02.07.

10. Геомеханический мониторинг за состоянием земной поверхности и деформациями бортов карьеров / Е. А. Горбатова, О. С. Колесатова, Е. А. Романько, А. Н. Смяткин. – Текст : непосредственный // Горный журнал. – № 4. – 2020. – С. 1–20.

11. Гмурман, В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике : учеб. пособие / В. Е. Гмурман. – 9-е изд. – Москва : Высшая Школа, 2004. – 404 с. – Текст : непосредственный.

12. Горшков, Н. И., Напряженно-деформированное состояние и устойчивость бортов карьера Унгличикан / Н. И. Горшков, М. А. Краснов, С. М. Жданова. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Горный журнал. – 2021. – № 6. – С. 42–56. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-6-42-56.

13. ГОСТ Р 50779.21-2004. Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Часть 1. Нормальное распределение. Москва : Стандартинформ, 2004. – 43 с. – Текст : непосредственный.

14. Защита транспортных берм от камнепада с уступов бортов глубоких карьеров / В. Г. Шубин, Б. Н. Заровняев, А. Н. Акишев, Э. Р. Лукин. – Текст : непосредственный // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2019. – Вып. 2. – С. 243–252.

15. Зотеев, В. Г. Оценка возможности использования «Руководства по проектированию карьеров» при проектировании открытой разработки рудных месторождений в условиях современной России. Рецензия Зотеева В. А. – URL: <https://mining-media.ru/ru/article/ogr/11267-otsenka-vozmozhnosti-ispolzovaniya-rukovodstva-po-proektirovaniyu-bortov-karerov-pri-proektirovanii-otkrytoj-razrabotki-rudnykh-mestorozhdenij-v-usloviyakh-sovremennoj-rossii>. – Текст : электронный.

16. Ильин, С. А. Состояние и перспективы развития открытого способа разработки месторождений полезных ископаемых / С. А. Ильин, Д. В. Пастихин. – Текст : непосредственный // ГИАБ. – 2013. – № 1. – С. 364–383.

17. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. – Ленинград : ВНИМИ, 1971. – 193 с. – Текст : непосредственный.

18. Использование (опыт тестирования) георадара на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере Михайловского ГОКа им. А.В. Варичева / Р. И. Исмагилов, А. Г. Захаров, Б. П. Бадтиев, Н. В. Сенин, А. А. Павлович, А. С. Свириденко. – Текст : непосредственный // Горная промышленность. – 2020. – № 3. – С. 84–90.

19. Йулдошев, У. У. Открыто-подземное вскрытие глубоких горизонтов карьера «Мурунтау» / У. У. Йулдошев. – Текст : непосредственный // Горный журнал. – 2018. – № 9. – С. 33–37.

20. Калюжный, А. С. Установление причин обрушения участка борта карьера на основе радарного мониторинга и расчетов устойчивости / А. С. Калюжный, И. Ю. Розанов. – Текст : непосредственный // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2024. – № 1. – С. 40–49.

21. Клебанов, А. Ф. Современная система контроля устойчивости бортов карьеров на основе использования радаров MSR. / А. Ф. Клебанов, М. А. Макеев, Н. В. Монахов. – Текст : непосредственный // Горная промышленность. – 2015. – № 1 (119). – С. 75–76.

22. Козырев, А. А. Особенности развития геомеханических процессов в массивах пород глубоких карьеров / А. А. Козырев, Э. В. Каспарьян, В. В. Рыбин. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 4. – С. 32–40.

23. Коли, Н. Мониторинг в реальном времени устойчивости бортов карьера с помощью усовершенствованной радиолокационной технологии / Н. Коли, У. Райх. – Текст : непосредственный // Маркшейдерский вестник. – 2016. – № 2. – С. 31–35.

24. Корецкая, Г. А. Спутниковые навигационные системы в маркшейдерии : учеб. пособие / Г. А. Корецкая. – Кемерово : КузГТУ, 2012. – 93 с. – Текст : непосредственный.

25. Косарев, Н. С. О необходимости создания отечественного программного обеспечения для автоматизированного геодезического мониторинга / Н. С. Косарев. – текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 3. – С. 5–14. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-5-14

26. Кулешов, А. А. Об эксплуатации глубоких рудоспусков на апатитовых карьерах Заполярья А. А./ Кулешов. – Текст : непосредственный // Записки Горного института. – 1964. – Т. 49. Вып. 1. – С. 28–35.

27. Макаров, А. Б. Радарный мониторинг устойчивости бортов карьеров / А. Б. Макаров, А. И. Ананин, В. И. Спирин. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов ВНИИЦВЕТМЕТА. – 2018. – Усть-Каменогорск. – С. 15–28.

28. Макеев, М. А. Инновации на службе промышленной безопасности: опыт использования передовых радарных систем контроля устойчивости бортов карьеров - Reutech на предприятиях РФ / М. А. Макеев. – Текст : непосредственный // Горная Промышленность. – 2017. – № 2 (132). – С. 48–49.

29. Макеев, М. А. Современная система устойчивости бортов карьеров. Преимущества использования радаров MSR / М. А. Макеев, Н. В. Монахов. – Текст : непосредственный // Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий : Сборник научных трудов V и VI Международных научно-практических конференций (Санкт-Петербург, 2014, 2015 г.) – Санкт-Петербург, 2017. – С. 91–93.

30. Мамаев, Д. С. Разработка программного обеспечения для геодинамического и геотехнического ГНСС мониторинга / Д. С. Мамаев, П. Ю. Бугаков. – Текст : непосредственный// Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр., 19–21 мая 2021 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т 7, № 2 : Междунар. науч. конф. «Молодежь. Инновации. Технологии». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – С. 114–120.

31. Мельников, Н. Я. Использование сейсмического и радарного мониторинга при оценке оползневых явлений на карьерах / Н. Я. Мельников, М. Е. Мельницкая. – Текст : непосредственный // Научные исследования и разработки в эпоху глобализации : сборник статей международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 209–213.

32. Методические указания по изучению массива горных пород для обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. – М. : ИПКОН РАН, 2022. – 102 с. – Текст : непосредственный.

33. Методические указания по наблюдению за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретация их результатов и прогнозу устойчивости. – Ленинград : ВНИМИ, 1987. – 118 с. – Текст : непосредственный.

34. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости. – Ленинград : ВНИМИ, 1987. – 119 с. – Текст : непосредственный.

35. Методические указания по определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. – М. : ИПКОН РАН, 2022. – 80 с. – Текст : непосредственный.

36. Методические указания по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов. – М. : ИПКОН РАН, 2022 г. – 90 с. – Текст : непосредственный.

37. Мозер, Д. В. Определение сдвижений подработанных территорий шахты имени Т. Кузембаева Карагандинского угольного бассейна на основе использования современных технологий / Д. В. Мозер, А. Д. Каранеева, Н. И. Гей. – Текст : непосредственный // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 3 (98). – С. 76–80.

38. Мониторинг за устойчивостью бортов карьера с применением ГНСС оборудования / И. А. Асафьев, А. С. Корытов, Р. А. Друзь, А. В. Протасова, Е. Н. Беляев. – Текст : непосредственный // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований : материалы Международ. научно-

практической конференции «Геонауки-2022». – Иркутск : ИРНТУ, 2022. – Вып. 22. – С. 197–202.

39. Наследов, А. Д. SPSS 19. Профессиональный статистический анализ данных / А. Д. Наследов. – Санкт-Петербург : Питер, 2011. – 400 с. – Текст : непосредственный.

40. Носков, В. А. Риск-менеджмент при ведении открытых горных работ / В. А. Носков, Б. П. Бадтиев, А. А. Павлович. – Текст : непосредственный // Горный журнал. – 2020. – № 1. – С. 52–55.

41. О промышленной безопасности опасных производственных объектов : Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (ред. от 29.12.2022). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/. – Текст : электронный.

42. Об отнесении технического средства «Интерференционный радар типов IBIS, IBIS-S, IBIS-M, IBIS-L» к средствам измерений : приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 22.07.2013 № 136. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). – Москва, 2013. – Текст : непосредственный.

43. Об отнесении технического средства «Система контроля устойчивости бортов MSR300» к средствам измерений : приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 12.07.2017 № 1534. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). – Москва, 2017. – Текст : непосредственный.

44. Одабаи-Фард, В. В. Геодинамический мониторинг земной поверхности и объектов горнодобывающей промышленности при помощи метода радарной интерферометрии / В. В. Одабаи-Фард, М. Р. Пономаренко. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 11. – С. 59–67. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-59-67.

45. Ожигин, Д. С. Управление состоянием устойчивости прибортового массива на угольных разрезах : диссертация на соискание ученой степени доктора философии / Дмитрий Сергеевич Ожигин. – Караганда : Карагандинский государственный технический университет, – 2018. – 155 с. – Текст : непосредственный.

46. Основы управляемого обрушения уступов на открытых разработках / М. Г. Новожилов, Б. Н. Тартаковский, В. Д. Кирилук, А. Г. Шапарь. – Киев : Наукова думка, 1967. – 215 с. – Текст : непосредственный.

47. Особенности и перспективы реализации проекта федеральных норм и правил в области промышленной безопасности. Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов / М. В. Рыльникова, А. И. Перепелицин, О. В. Зотеев, И. Л. Никифорова. – Текст : непосредственный // Горная промышленность. – № 1. – 2020. – С. 132–139.

48. Открытые горные работы – XXI век : справочник : в 2 т. / Ю. И. Анистратов, К. Ю. Анистратов [и др.]. – Москва : ООО «Система максимум», 2019 г. – Т. 2. – 872 с. – Текст : непосредственный.

49. Официальный сайт компании GroundProbe. – URL: <https://www.groundprobe.com/product/rgr-velox/?lang=ru>. – Текст : электронный.

50. Официальный сайт компании GroundProbe. – URL: <https://www.groundprobe.com/product/gms-prism/?lang=ru>. – Текст : электронный.

51. Официальный сайт компании Hexagon. – URL: <https://idsgeoradar.com/en/about-us/news-overview/2017/04/ids-georadar-unveils-next-generation-radar-revolutionizing-safety-in-slope-monitoring>. – Текст : электронный.

52. Официальный сайт компании Orica. – URL: <https://www.orica.com/digital-solutions/geosolutions/groundprobe/slope-stability-radars/groundprobe-ssr-omni>. – Текст : электронный.

53. Панжин, А. А. Применение спутниковых систем в маркшейдерском деле / А. А. Панжин, Б. П. Голубко. – Текст : непосредственный // Известия Уральской Государственной горно-геологической Академии. – 2000. – № 11. – С. 183–195.

54. Пономаренко, М. Р. Разработка метода деформационного мониторинга открытых горных работ в условиях Крайнего севера с использованием космического радиолокационного зондирования : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – СПб. : Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 2018. – 155 с.

55. Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов : утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) от 13.11.2020 № 439. – Москва, 2020. – 86 с. – Текст : непосредственный.

56. Правила осуществления маркшейдерской деятельности : приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19.05.2023 г. № 186. 2023. 76 с. – Текст : непосредственный.

57. Применение спутниковой радарной интерферометрии для анализа смещений земной поверхности / Р. В. Шевчук, А. И. Маневич, Д. Ж. Акматов, И. В. Лосев, А. А. Камаев. – Текст : непосредственный // Горная промышленность. – 2025. – № 6. – С. 97–104.

58. Рахимов, В. Р. Мониторинг и оценка устойчивости северного борта карьера «Кальмакыр» с использованием современных маркшейдерско-геодезических технологий / В. Р. Рахимов, Д. И. Мингбаев. – Текст : непосредственный // Горный журнал. – 2013. – № 7. – С. 18–22.

59. Розанов, И. Ю. Анализ результатов измерений радарной системы мониторинга устойчивости борта карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК» / И. Ю. Розанов, Д. А. Ковалев. – Текст : непосредственный // Цифровые технологии в горном деле : тезисы докладов. – Апатиты : 2021. – С. 57.

60. Розанов, И. Ю. Исследование кинематических параметров обрушений массивов прочных скальных пород (на примере Ковдорского месторождения апатитовых и магнетитовых руд) : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 2.8.6. – Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, 2023 г. – 135 с. – Текст : непосредственный.

61. Руководство по проектированию бортов карьера / под ред. Дж. Рида, П. Стейси. – Екатеринбург : Правовед, 2015. – 544 с. – Текст : непосредственный.

62. Рыбин, В. В. Возможность динамических проявлений горного давления в карьерах / В. В. Рыбин, К. Н. Константинов, А. С. Калюжный. – Текст : непосредственный // Горная промышленность. – 2023. – № S1. – С. 56–60.

63. Современные аспекты мониторинга деформаций земной поверхности при разработке месторождений открытым способом / М. Ю. Васильев, А. В. Ковязин, Е. Е. Квятковская, М. Р. Пономаренко – Текст : непосредственный // Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Сборник научных трудов. – 2017. – С. 283–287.

64. Современные методы геотехнического мониторинга и гидрогеологических исследований на карьерах Олимпиадинского ГОКа / В. П. Бережной, А. Е. Кулешов, В. А. Шаворин, В. Н. Лушников. – Текст : непосредственный // Горный журнал. – 2020. – № 10. – С. 26–29.

65. Современные технологии маркшейдерского обеспечения открытых горных работ : учеб. пособие / Л. А. Усольцева, Ю. А. Васянович, А. А. Григорьев, В. А. Мурзин. – Владивосток : Инженерная школа ДВФУ, 2014. – 81 с. – Текст : непосредственный.

66. Сравнение точности определения объемов сыпучих материалов по данным съемки с беспилотных летательных аппаратов и геодезическим измерениям / А. В. Комиссаров, Е. И. Аврунев, Х. К. Ямбаев, Е. П. Хлебникова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – Т. 24, № 4. – С. 70–77.

67. Технология ведения горных работ. Методические рекомендации по сохранению устойчивости откосов уступов при производстве работ на глубоких и сверхглубоких карьерах / К. А. Гребенюк, Л. Ф. Скорик, В. Е. Герасименко, П. Г. Ворсин. – Красноярск : 2025, – С. 96. – Текст : непосредственный.

68. Тимофеева, Ю. В. Контроль устойчивости бортов карьера с помощью радиолокаторов MSR / Ю. В. Тимофеева, С. А. Суксова, Л. А. Усольцева. – Текст : непосредственный // Вестник Евразийской науки. – 2020. – Т. 12, № 4.

69. Фисенко, Г. Л. Обеспечение безопасности ведения горных работ в условиях деформирующихся бортов разрезов / Г. Л. Фисенко, В. Т. Сапожников. – Текст : непосредственный // Труды ВНИМИ. – 1980. – С. 88–95.

70. Химичев, С. С. Автоматизированные системы деформационного мониторинга / С. С. Химичев, Б. П. Голубко. – Текст : непосредственный // Уральская школа – регионам : сборник докладов Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2017. – С. 379–380.

71. Чурсин, Н. И. Спутниковый мониторинг сдвижения подработанной земной поверхности в Кузбассе с использованием радарной интерферометрии / Н. И. Чурсин. – Текст : непосредственный // Маркшейдерский вестник. – 2021. – № 4 (143). – С. 56-60.

72. Шаворин, В. А. Вычисление объемов горной массы забоя экскаватора методом наземной интерферометрии по результатам сканирования георадара Reutech MSR300 / В. А. Шаворин. – Текст : непосредственный // Естественные и технические науки. – 2022. – № 12. – С. 361–369.

73. Шаворин, В. А. Исследование точности систем измерения сдвигов бортов на примере 3D радара Groundprobe SSR-XT / В. А. Шаворин, А. С. Горилько. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 22–24 апреля 2020 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. Т. 1, № 1. – С. 144–151. DOI 10.33764/2618-981X-2020-1-1-144-151.

74. Шаворин, В. А. К вопросу об актуальности импортозамещения в сфере гражданского наземного интерферометрического сканирования / В. А. Шаворин. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 8 т. (Новосибирск, 17–19 мая 2023 г.) – Новосибирск : СГУГиТ, 2023. Т. 1. – С. 154–161. DOI 10.33764/2618-981X-2023-1-1-154-161.

75. Шаворин, В. А. Современные методы наземной интерферометрии при мониторинге прибортовых массивов на открытых горных работах / В. А. Шаворин, А. Е. Кулешов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 8 т. (Новосибирск, 19–21 мая 2021 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. Т. 1. – С. 111–118. DOI 10.33764/2618-981X-2021-1-111-118.

76. Шаворин, В. А. Схема методики обработки данных наземного интерферометрического сканирования / В. А. Шаворин. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 8 т. (Новосибирск, 15–17 мая 2024 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2024. Т. 1. – С. 132–137. – DOI: 10.33764/2618-981X-2024-1-132-137.

77. Шоломицкий, А. А. Сравнение интерпретации данных наземных георадаров с результатами геодезических методов наблюдений при мониторинге деформаций на открытых горных работах / А. А. Шоломицкий, В. А. Шаворин. – Текст : непосредственный // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2025. – Т. 10, № 3 (41). – С. 89–96. – DOI 10.25744/genb.2025.3.41.014.

78. A new radar-based system for detecting and tracking rockfall in open pit mines / A. Micheline, F. Viviani, M. Bianchetti, N. Coli, L. Leoni, CJ. Stopka. – Текст : непосредственный // Australian Centre for Geomechanics, Perth, Slope Stability. – 2020. – P. 1183- 1191.

79. A study on 2000+ slope failures in open pit mines detected with interferometric radars / Albert Cabrejo, Leonardo Probst, Rachmat Musa, Mulyadi Sannang. – Slope Stability 2022. – Tucson, AZ, 2022. – Текст : непосредственный.

80. A tool for estimating ground-based InSAR acquisition characteristics prior to monitoring installation and survey and its differences from satellite InSAR. / Wolff Ch., Derron M., Rivolta C., Jaboyedoff M. – Текст : непосредственный // Geosci. Instrum. Method. Data Syst. – 2024. – № 13. – P. 225–248. DOI: 10.5194/gi-13-225-2024.

81. Analysis and correction of meteorological disturbance observed by ground radars in complex environment / J. Wang, X. Zhou, S. Yu, B. Li, Y. Li. – Текст : непосредственный // PLOS ONE. – 2021. – Vol. 16(10). – DOI: 10.1371/journal.pone.0258168.

82. Australian Geomechanics. Landslide Risk Management // Journal and News of the Australian Geomechanics Society. – 2007. – Vol. 42, № 1. – 36 p. – Текст : непосредственный.

83. Caduff, R. A review of terrestrial radar interferometry for measuring surface change in the geosciences / R. Caduff, F. Schlunegger, A. Kos. – Текст : непосредственный // Earth Surf. Process. Landforms. – 2014. – P. 208–228.

84. Casagrande, D. Monitoring and Risk-Control of Large-Scale Toppling Failures – a Case Study from Ok Tedi. / D. Casagrande, M. Klawitter, M. Koek. – Текст : электронный // ISRM International Symposium – EUROCK 2021 (Virtual, September 2021). – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/833/1/012171>.

85. Crosta, G. B. Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements / G. B. Crosta, F. Agliardi. – Текст : непосредственный // Canadian Science Publishing. – 2003. Vol. 40, № 1. – P. 176–191. – DOI:10.1139/t02-085.

86. Detecting Problems with Mine Slope Stability / G. R. Bockosh, M. Karmis, J. Langton, M. K. McCarter, B. Rowe, eds. – Текст : непосредственный // Proceedings of the Thirty-first Annual Institute on Mining Health, Safety and Research, Roanoke, Virginia, August 27–30, 2000. – Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000. – P. 147–155.

87. 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. / G. J. Dick. – Текст : непосредственный // A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of applied science. – 2013. – 436 p.

88. Ding, X. Integrated Monitoring Systems for Open Pit Wall Deformation / X. Ding, S. B. Montgomery, M. Tsakiri. – Australian Centre for Geomechanics, MERIWA Project Report No186. – 1998. – 148 p. – Текст : непосредственный.

89. Early warning monitoring of natural and engineered slopes with Ground-Based SyntheticAperture Radar / C. Atzeni, M. Barla, F. Pieraccini, A. Antolini. – Текст : непосредственный // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2015. – Vol. 48(1). – P. 235–246. DOI: 10.1007/s00603-014-0554-4.

90. From, Patton F. D. Significant geologic factors in rock slope stability/ Patton F. D. From, D. U. Deare. – Текст : непосредственный // In: Van Rensburg, P. W. J. (ed.) Planning Open Pit Mines. Proceedings of the Symposium on the Theoretical Background to Planning of Open Pit Mines with Special Reference to Slope Stability. South African Institute of Mining and Metallurgy, 1970. – P. 143–151.

91. Ground-Fall Accident Trends in Mining: 2010 to 2019. / Z. Khademian, G. Rashed, M. Sears, Y. Xue. – Текст : электронный. – URL : <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/215548>.

92. GroundProbe / Orica. Providing a decisively clearer view of real deformation at Bingham Canyon : Case Study. – Октябрь 2022. – URL: <https://www.orica.com/resource-hub/case-study/2022/providing-a-decisively-clearer-view-of-real-deformation-at-bingham-canyon>. – Текст : электронный.

93. Harries, N. Case studies of slope stability radar used in open cut mines / N. Harries, D. Noon, K. Rowley. – Текст : непосредственный // International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering 2022. The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2022. – P. 335–342.

94. Health & Safety Executive. The tolerability of risk from nuclear power stations / Health & Safety Executive. – London : HMSO. – 61 p. – Текст : непосредственный.

95. Hoek, E. Rock Slope Engineering: Third Edition / Hoek, E., Bray, J. D. – Текст : непосредственный // – Boca Raton : CRC Press, 1974. – DOI: 10.1201/9781482267099.

96. Intrieri, E. Forecasting the time of failure of landslides at slope-scale: A literature review / E. Intrieri, T. Carlà, G. Gigli – Текст : непосредственный // *Earth-science reviews*. – 2019. – Vol. 193. – P. 333–349.
97. Kumar, A. Monitoring and evaluating of slope stability for setting of out of critical limit at slope stability radar / A. Kumar, R. Rathee. – Текст : непосредственный // *International Journal of Geo-Engineering*. – 2017. – Vol. 8. – DOI: 10.1186/s40703-017-0054-y.
98. Little, M. J. Slope Monitoring Strategy at PPRust Open Pit Operations / M. J. Little. – Текст : непосредственный // *International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering The South African Institute of Mining and Metallurgy, Symposium Series 44*. – 2006. – P. 211–230.
99. Local deformation monitoring using GPS in an open pit mine: initial study / D. Kim, R. B. Langley, J. Bond, A. Chrzanowski. – Текст : непосредственный // *Springer Nature*. – 2003. – P. 176–185.
100. Macqeen, G. K. Application of radar monitoring at Savage River Mine / G. K. Macqeen, E. L. Salas, B. J. Hutchison. – Текст : непосредственный // *Slope Stability 2013. Tasmania, 2013*. – P. 1011–1020.
101. Mark, C. P. D. Ground Control Issues For Safety Professionals – Introduction / C. P. D. Mark, A. T. P. D. Iannacchione. – Текст : непосредственный // *Mine Health & Safety Management*. – 2001.
102. Mazzanti, P. Remote monitoring of deformation. An overview of the seven methods de-scribed in previous GINs / P. Mazzanti. – Текст : непосредственный // *Geotech. Instrum.* – 2012. – № 30. – P. 24–29.
103. Niekrasz, J. Review of radar system performance and estimation of slope deformation threshold values for the Leveaniemi open pit / J. Niekrasz. – Текст : непосредственный // *School of Engineering, Master's thesis*. – 2018. – P. 90.
104. Post-blast slope stability monitoring with slope stability radar / P. Saunders, J. M. Kabuya, A. Torres, R. Simon. – Текст : непосредственный // *Slope Stability 2020. Australian Centre for Geomechanics*. – Perth, 2020. – P. 507–521.

105. Rajmeny, P. Assessing Stability of a Pit Slope using Observed Correlation between Surficial Damage and Strain Level during o Planar Failure Monitored by Radar / P. Rajmeny. – Текст : непосредственный // Global Journal of Researches in Engineering : A Mechanical and Mechanics Engineering. – 2021. – Vol. 21 Iss. 1, Version 1.0. – P. 8–23.

106. Ramondini, M. Application of DInSAR data for slow-moving landslides monitoring / M. Ramondini. – Dottorato di Ricerca in Analisi dei Sistemi Ambientali, XXV Ciclo, Ing. Massimo Ramondini. – 128 p. – Текст : непосредственный.

107. Risk management and alarming based on a new atmospheric correction algorithm ground-based radars. / A. Cabrejo, P. Bellet, G. Stickley, R. Silva, Y. Gunaris, J. Perez. – Текст : непосредственный // Slope Stability 2020. Australian Centre for Geomechanics. – Perth, 2020. – P. 319–338.

108. RockSpot. IDS GeoRadar. Руководство пользователя. – Текст : электронный. // Manualslib : [сайт]. – 2020. – URL: <https://www.manualslib.com>.

109. Rozanov, I., Determination of Critical Deformation and Destruction Parameters of the Zhelezny Open Pit Rock Mass (JSC Kovdorsky GOK) Based on IBIS FM Ground Radar Data. / I. Rozanov, A. Zavialov. – Текст : непосредственный // Trigger Effects in Geosystems. : Proceedings of the International Conference (Moscow, 4–6 June 2019) / ed. by G. Kocharyan, A. Lyakhov. – Cham : Springer, 2019. – P. 387–393.

110. Shellam, J. C.R. Analysis of velocity and acceleration trends using slope stability radar to identify failure signatures to better inform deformation trigger action response plans / J. C. R. Shellam. – Текст : непосредственный // Slope Stability 2020. Australian Centre for Geomechanics. – Perth, 2020. – С. 227–240.

111. Slope monitoring plan and risk management process: Case study – Chadormalu open pit mine / Madadi Soroush Ali, Janaki Saeed Mahmoudi, Rezaeipour Abolfazl, Yousef Abolfazlzadeh. – Текст : электронный // 59th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium (Santa Fe, New Mexico, June 2025). – URL:

https://www.researchgate.net/publication/394339342_Slope_monitoring_plan_and_risk_management_process-Case_study_Chadormalu_open_pit_mine.

112. The atmospheric disturbance correction model in slope deformation monitoring using IBIS-L system. / X. Zuo, H. Yu, C. Zi et al. – Текст : непосредственный // Cluster Comput. – 2016. – Vol. 19. – P. 2157–2167. – DOI: 10.1007/s10586-016-0664-8.

113. Vaziri, A. Monitoring systems for warning impending failures in slopes and open pit mines / A. Vaziri, L. Moore, H. Ali. – Текст : непосредственный // Nat Hazards. – 2010. – № 55. – P. 501–512. – DOI: 10.1007/s11069-010-9542-5.

114. Wyllie, D. C. Rock Slope Engineering: Civil Applications, Fifth Edition (5th ed.). / D. C. Wyllie. – Текст : непосредственный // CRC Press. – 2017. – DOI: 10.4324/9781315154039.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)
АКТ О ВНЕДРЕНИИ



**Акт
о внедрении результатов научных исследований**

Настоящим актом подтверждается, что результаты научных исследований Шаворина Виталия Андреевича, касающиеся совершенствования методов мониторинга горного массива на открытых горных работах с применением наземного интерферометрического сканирования успешно внедрены в производственный процесс АО «Полюс Красноярск».

На основании проведенных исследований Шавориным В.А. разработана матрица реагирования при радарном мониторинге карьеров, методика интерпретации данных наземного интерферометрического сканирования для SAR и RAR радаров, используемых в АО «Полюс Красноярск», утверждена и внедрена инструкция №20-02 «План реагирования при радарном мониторинге на карьерах АО «Полюс Красноярск».

Директор департамента
геотехники и гидрогеологии ООО «УК Полюс»

Лушников В.Н.

