

На правах рукописи

Шаворин Виталий Андреевич



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

1.6.22. Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Шоломицкий Андрей Аркадьевич.

Официальные оппоненты:

Соловицкий Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет», профессор кафедры геологии и географии.

Розанов Иван Юрьевич, кандидат технических наук, Горный институт – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», старший научный сотрудник лаборатории «Геомониторинга и устойчивости бортов карьеров» отдела геомеханики.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (г. Иркутск).

Защита состоится 6 октября 2026 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, д. 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»: <https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/shavorin-vitaliy-andreevich/>

Автореферат разослан 30 июня 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 01.06.2026.

Формат 60×84 1/16. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 88.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Только подобный комплексный подход, включающий систематический контроль и анализ данных наблюдений, позволит эффективно управлять рисками и обеспечить долгосрочную устойчивость карьерных выработок.

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 ин-

струкций 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., Малинникова 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 науч-

ных 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, формулируется цель и задачи, их научная новизна, теоретическая и практическая значимость, устанавливается достоверность результатов исследования, а также приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе диссертационной работы рассмотрены современные методы мониторинга сдвижения горных пород при разработке полезных ископаемых открытым способом, применяемые в России и за рубежом. Выполнена систематизация технических средств для производства деформационного мониторинга, которая позволила выявить ключевые эксплуатационные и метрологические характеристики современных методов измерений, а также проведен сравнительный анализ этих методов (таблица 1).

Таблица 1 – 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)
-----------------------------	-----------------------	------------------------	------------------------	------------------------------

Наиболее эффективной технологией мониторинга деформаций на открытых горных работах, согласно рассчитанному среднему индексу эффективности (3,7), является технология наземного интерферометрического сканирования.

К ее ключевым особенностям относятся:

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.

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).

Таким образом, комплексный анализ подтверждает, что для организации непрерывного мониторинга деформаций бортов и уступов карьеров технология наземного радиолокационного интерферометрического сканирования (GB-InSAR) 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.

Таким образом, проблемы внедрения наземных интерферометрических радаров в существующую систему геодезического мониторинга, определение пороговых значений смещений горного массива и выявлении ложных срабатываний являются актуальными и требуют изучения и разработки решений.

Во втором разделе выполнено теоретическое обоснование периодичности наблюдений такими методами, как роботизированный тахеометр, ГНСС и наземное интерферометрическое сканирование, приведена разработанная автором схема проекта системы геодезического мониторинга, с внедрением наземных интерферометрических радаров как основного метода мониторинга, на котором строится вся система.

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 была использована формула расчета периодичности наблюдений относительно интервала времени между циклами наблюдений Δt , сут:

$$\Delta t \leq \frac{M \cdot k \sqrt{2}}{V_{lim}}, \quad (1)$$

где M – точность определения деформации, мм;

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

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

Принято условие, что требуемая точность определения деформации M эквивалентна паспортной точности измерений. Паспортная точность различного оборудования приведена в таблице 2.

Таблица 2 – 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 – $(10+0,5 \cdot D)$	

Окончание таблицы 2

№	Тип оборудования	Паспортная точность измерения (мм)	Примечание
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 (1), и систематизированы в таблице 3.

Таблица 3 – 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.

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

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.

На рисунке 1 приведена схема проекта двухуровневой системы мониторинга с внедрением технологии наземного интерферометрического сканирования как основного базового метода.

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.

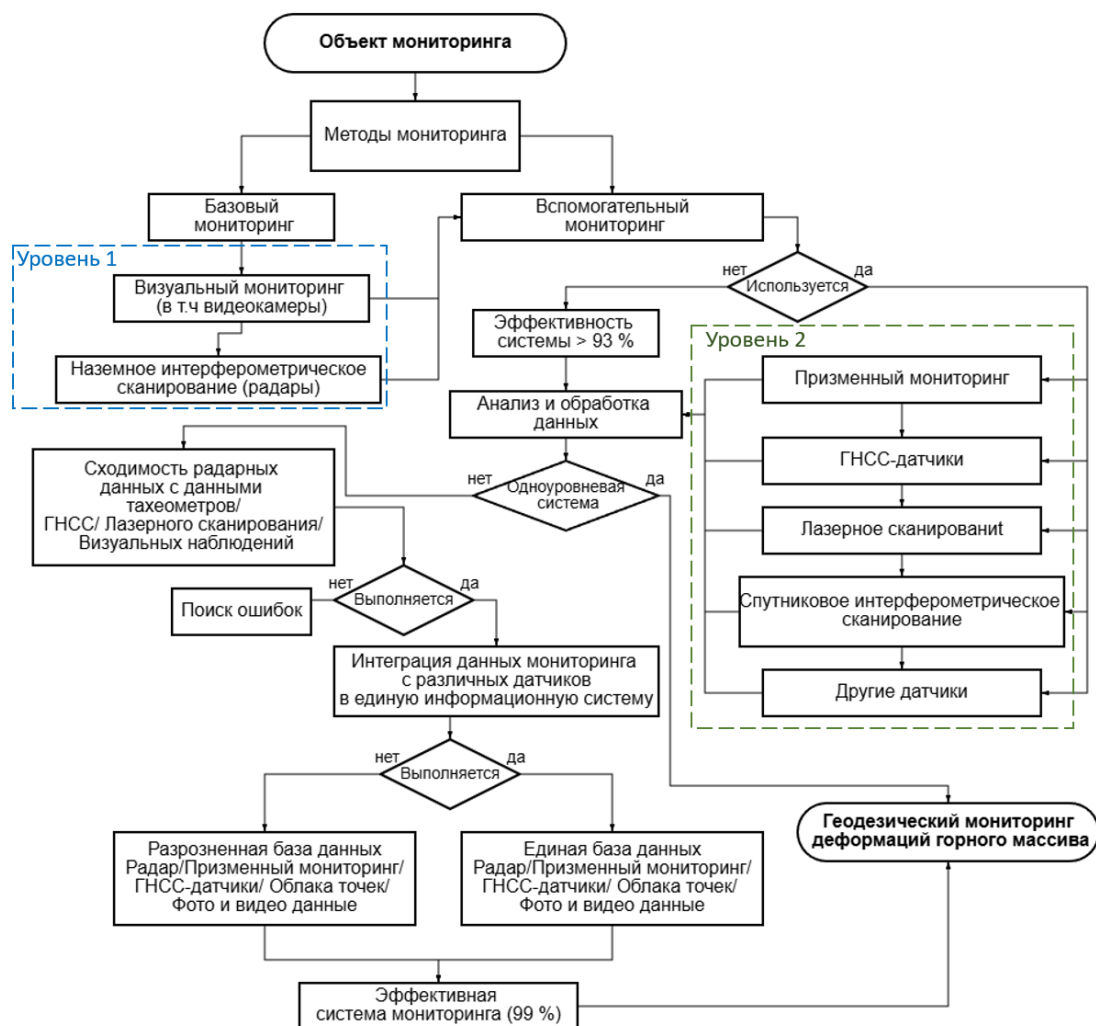


Рисунок 1 – Схема проекта эффективной системы геомеханического мониторинга с внедрением технологии наземного интерферометрического сканирования

В третьем разделе изложена методика интерпретации данных сканирования наземных интерферометрических радаров, и представлена разработанная автором алгоритмическая блок-схема (рисунок 2). Данная схема предназначена для помощи специалистам в принятии решений при срабатывании аварийных сигналов радарных систем мониторинга.

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

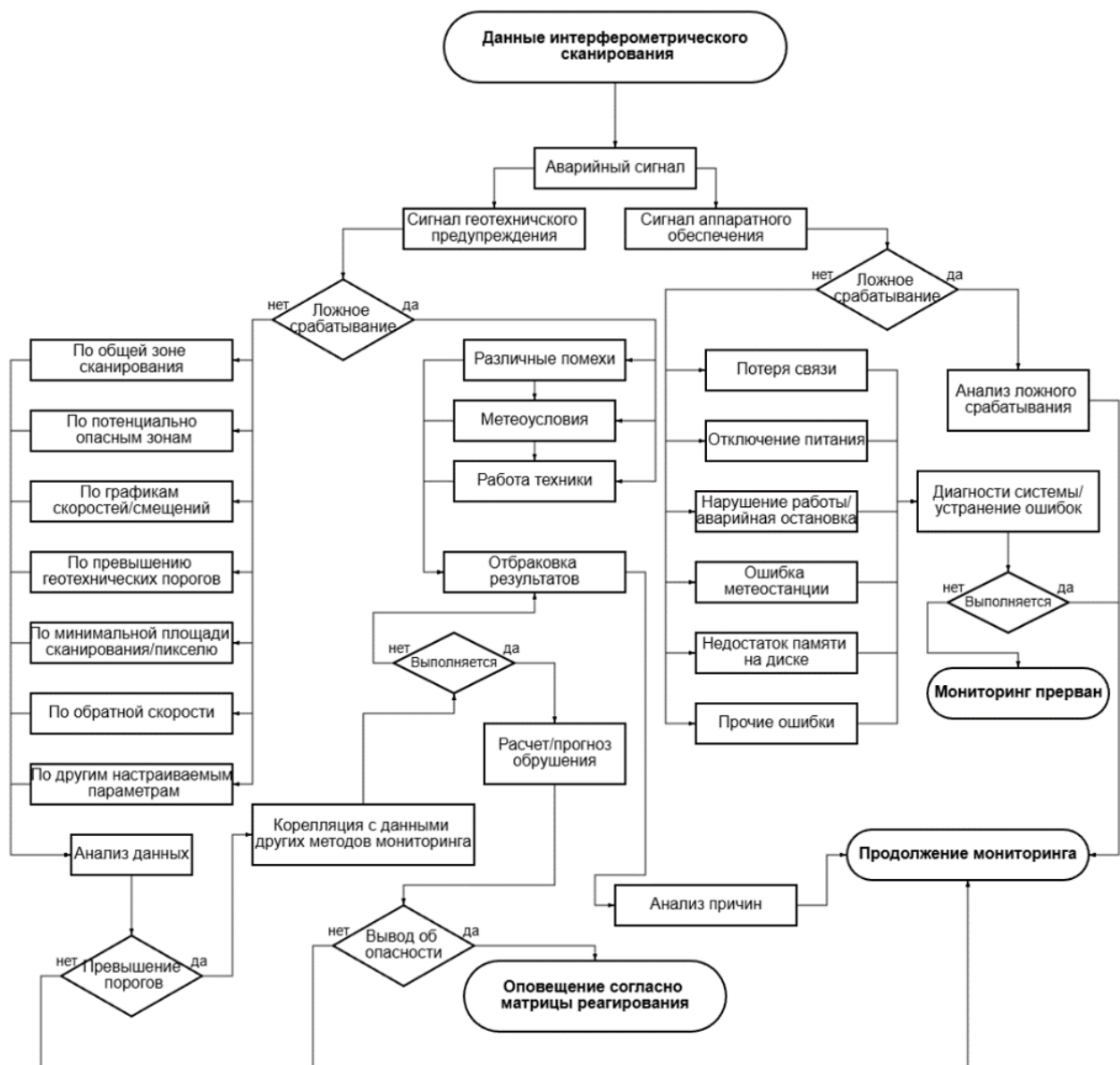


Рисунок 2 – Алгоритм обработки данных интерферометрического сканирования

Проведен сравнительный анализ данных сканирования деформации борта карьера интерферометрическим радаром (Reutech MSR300) с данными, полученными традиционными геодезическими методами, такими как роботизированный тахеометр (Leica TM50), и замерах трещиномеров.

По результатам интерпретации корреляционной матрицы Пирсона (рисунок 3) установлено, что все методы мониторинга демонстрируют значения коэффициентов корреляции ниже 0,05. Это позволяет сделать вывод о статистически значимой корреляции между рассматриваемыми методами.

Корреляция накопительного смещения (трещиномер/репер/радар)				
		смещение_т рециномер_ Tp_5	смещение_р епера_s4	смещение_р адар_MSR
смещение_трещиномер _Tp_5	Корреляция Пирсона	--		
	N	14		
смещение_репера_s4	Корреляция Пирсона	,987**	--	
	знач. (двухсторонняя)	<,001		
	N	14	14	
смещение_радар_MSR	Корреляция Пирсона	,553*	,560*	--
	знач. (двухсторонняя)	,040	,037	
	N	14	14	14
**. Корреляция значима на уровне 0,01 (двухсторонняя).				
*. Корреляция значима на уровне 0,05 (двухсторонняя).				

Рисунок 3 – Результаты количественного анализа корреляции данных репера S4, трещиномера Tp5 и MSR300

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.

На рисунке 4 представлен график накопительного смещения по результатам сканирования радара, наблюдений по трещиномерам и реперам.

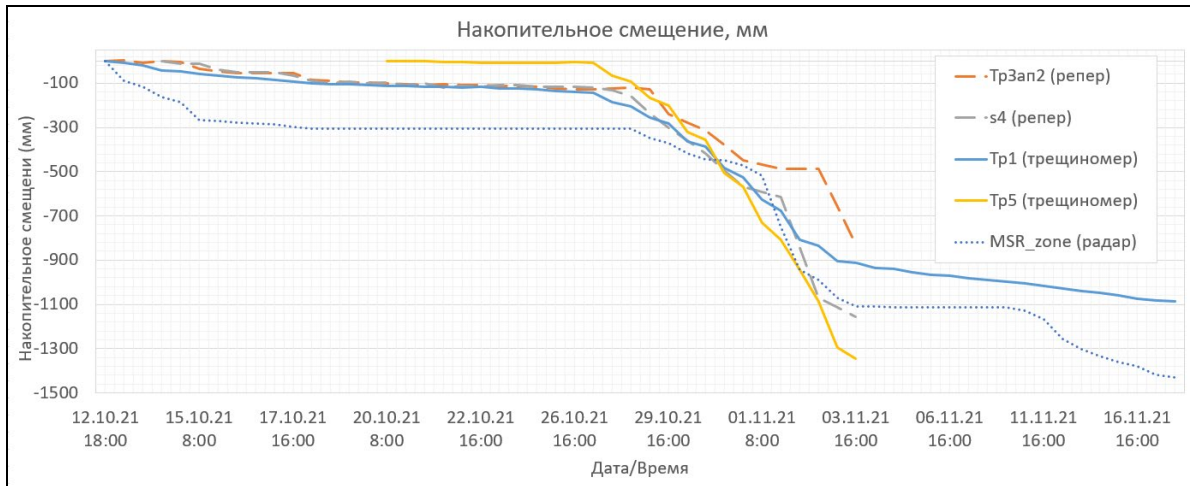


Рисунок 4 – График накопительного смещения

по результатам сканирования радара, наблюдений по трещиномерам и реперам

Разработанный комплексный подход к мониторингу, сочетающий различные методы контроля, позволяет 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.

В четвертом разделе выполнен анализ данных мониторинга с использованием интерферометрического радара, который показал, что 41 % зарегистрированных срабатываний за анализируемый период являются ложными.

В период с 01.05.2023 по 31.12.2023 по одному из радаров на производственной площадке было зафиксировано 83 срабатывания. Из общего числа срабатываний 54 предупреждения носили характер сигнализации аппаратного обеспечения, указывающие на неисправность или ошибки в работе самого радара. Оставшиеся 29 срабатываний были интерпретированы как геотехнические предупреждения, свидетельствующие о потенциальных изменениях состояния горного массива. Эти данные представлены на рисунке 5.

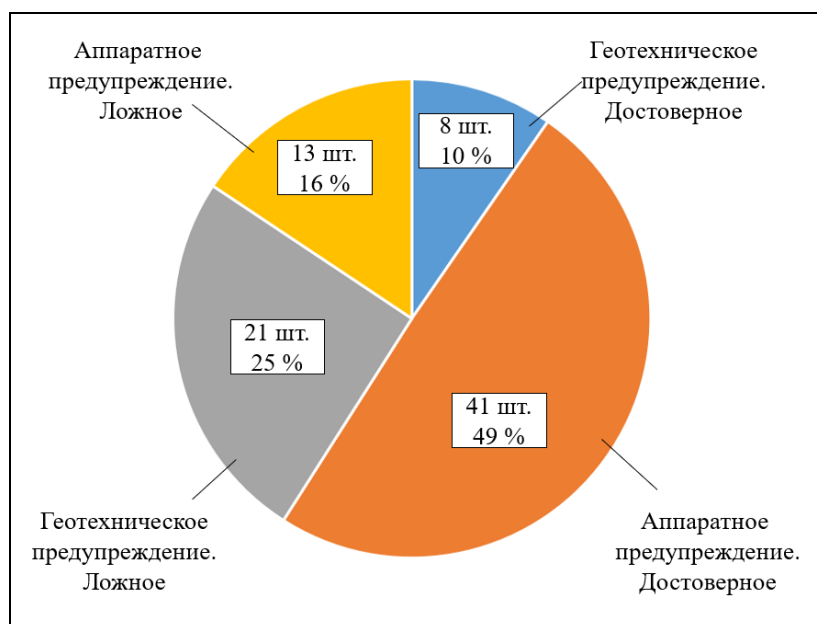


Рисунок 5 – Результаты сигнализации радара
в период с 01.05.2023 по 31.12.2023

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.

Обоснована методика разработки адаптированных матриц реагирования для наземного интерферометрического мониторинга деформационных процессов на карьерах. Статистический анализ зафиксированных случаев обрушений на карьере выявил наличие сильной положительной, статистически значимой корреляции между ключевыми параметрами: скорость деформации – смещение (0,761) и смещение – объем (0,544). Установлено, что характеристики горного массива оказывают существенное влияние на размер предполагаемого обрушения.

На основе выявленных закономерностей разработана пятиуровневая матрица реагирования (таблица 4), интегрирующая два наиболее значимых и коррелирующих параметра – скорость смещения и объем потенциального вывала. Предложенная матрица предусматривает четкую регламентацию действий опе-

ративного персонала в зависимости от уровня риска, что позволяет формализовать процесс принятия решений при мониторинге устойчивости бортов, классифицировать риски от ожидаемых деформаций и определять реакцию на ожидаемые события и уровни риска (таблица 5).

Таблица 4 – 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

Таблица 5 – Уровни риска и реакция на него

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 неустойчивого участка	Главный геотехник, Старший инженер-геомеханик

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 фор-

мализовать процесс принятия решений при мониторинге устойчивости бортов;

– результаты научной работы апробированы и внедрены в производственный процесс АО «Полус 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. 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.

2. 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. (К 1).

3. 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. (К 2).

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.