

На правах рукописи

ПОНОМАРЕНКО Мария Руслановна



**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДЕФОРМАЦИОННОГО
МОНИТОРИНГА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ В
УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОСМИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ**

*Специальность 25.00.16 – Горнопромышленная и
нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское
дело и геометрия недр*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель

доктор технических наук

Цирель Сергей Вадимович

Официальные оппоненты:

Шнаков Петр Сергеевич

доктор технических наук, профессор, Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», кафедра технологии машиностроения, профессор

Журавлев Алексей Евгеньевич

кандидат технических наук, ООО «Газпром проектирование», Управление инженерных изысканий и сбора исходных данных, ведущий инженер

Ведущая организация – ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Защита состоится 19 декабря 2018 г. в 13 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.08 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 19 октября 2018 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



СКАЧКОВА
Мария Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Систематические наблюдения за состоянием земной поверхности и расположенных на ней горнотехнических объектов при открытом способе разработки месторождений полезных ископаемых (МПИ) являются обязательным условием обеспечения безопасности и технико-экономической эффективности горного производства. Особенности физико-географических и горно-геологических условий территорий горных предприятий (ТГП) и горнотехнических объектов диктуют определенные требования к мониторингу безопасности, в частности - деформационному мониторингу (ДМ) как важнейшему компоненту комплексного мониторинга. В настоящий момент времени в горной промышленности практически отсутствует современная нормативно-методическая база, регламентирующая организацию и выполнение данного вида мониторинга. Разнообразие горнотехнических объектов открытых разработок, характеризующихся различной степенью сложности, предопределяет использование комплексного подхода к производству ДМ, состав работ, программа и параметры которого должны быть напрямую увязаны с их целевым назначением, инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями, а также геодинамическими процессами и явлениями. Анализ и типизация объектов на ТГП необходимы для подбора более эффективных вариантов организации системы ДМ.

В современной практике на горных предприятиях мониторинг деформаций земной поверхности и горнотехнических объектов производится с использованием различных маркшейдерско-геодезических методов, включая традиционные оптические, перспективные фотограмметрические (наземные, аэрофотосъемка с БПЛА) и радиолокационные наблюдения. В последние годы в нашей стране и за рубежом в практике геодезических работ находит все более широкое применение космическое радиолокационное зондирование (КРЗ). Однако сегодня для деформационных наблюдений ТГП данный вид работ применяется только на отдельных МПИ. В исследованиях, проводимых по данной тематике, рассматриваются особенности использования метода на конкретных ТГП. При этом отсутствуют методики и рекомендации по

выполнению КРЗ в составе комплексного ДМ в целом для различных МПИ. В этой связи, задача научно-методического обоснования деформационного мониторинга горных предприятий с использованием космического радиолокационного зондирования является актуальной. Эффективное применение КРЗ в системе ДМ требует адаптации существующих методик измерения деформаций применительно к горнотехническим объектам и физико-географическим условиям ТГП, в частности – месторождениям полезных ископаемых, расположенных в Заполярье.

Основы мониторинга состояния природной среды в конце прошлого века заложили Израэль Ю.И., Герасимов И.П., Епишин В.К., Трофимов В.Т., Бондарик Г.К., Ярг Л.А., Сергеев Е.М., Королев В.А., Мироненко В.А., Гамбурцев А.Г. и др. В геодезии и маркшейдерии разработке методологии измерений деформаций поверхности земли посвящены работы Фисенко Г.Л., Певзнера М.Е., Гусева В.Н. и др. В горном деле разработкой основ мониторинга занимались Гальперин А.М., Дашко Р.Э., Киянец А.В., Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Мосейкин В.В., Протасов С.И., Цирель С.В., Шабаров А.Н., Шпаков П.С., Сергина Е.В. и др. Благодаря многолетней деятельности этих специалистов разработано инженерно-геологическое, геомеханическое (гидрогеомеханическое), маркшейдерское обеспечение безопасности горнотехнических сооружений, успешно реализованное при разработке МПИ. Опыт применения КРЗ для наблюдения МПИ представлен в работах Баранова Ю.Б., Кантемирова Ю.И. Кашникова Ю.А., Мусихина В.В., Лыскова И.А., Евтюшкина А.В., Филатова А.В., Hanssen R.F., Ferretti A., Spreckels V., Wegmüller U. и др.

Однако современные потребности горного производства выдвигают новые задачи, требующие совершенствования научно-методического обоснования комплексного деформационного мониторинга территорий горных предприятий с использованием данных космического радиолокационного зондирования.

Цель работы: Повышение качества и точности деформационного мониторинга территорий горных предприятий с использованием данных космического радиолокационного зондирования в климатических условиях Крайнего Севера для обеспечения безопасности горных работ.

Идея работы: Повышение информативности маркшейдерских измерений при открытых горных работах в условиях Крайнего Севера осуществляется за счёт разработки системы деформационного мониторинга, включающего использование космического радиолокационного зондирования.

Задачи исследования:

1. Анализ горно-геологических условий открытой разработки МПИ, современных методов деформационного мониторинга земной поверхности.
2. Разработка типизации горнотехнических объектов на территории горного предприятия по степени сложности их условий.
3. Обоснование состава комплекса методов для осуществления деформационного мониторинга территорий горных предприятий по результатам оценки сложности горнотехнических объектов.
4. Разработка методики применения данных космического радиолокационного зондирования для решения задач деформационного мониторинга территорий открытых горных разработок.
5. Определение деформаций земной поверхности и анализ динамики их изменений по результатам обработки радарных снимков, полученных при съёмке в L, C и X-диапазонах.

Научная новизна:

1. Разработаны критерии и предложена типизация горнотехнических объектов на территории горного предприятия по степени их сложности с учётом их размеров, инженерно-геологических, гидрогеологических и орографических условий, развивающихся геодинамических процессов.
2. Установлено, что использование метода малых базисных расстояний позволяет определить деформации земной поверхности на ТГП по данным космического радиолокационного зондирования, полученным в L-диапазоне и разделённым длительным временным интервалом.

Защищаемые положения:

1. Обоснование деформационного мониторинга территорий горных предприятий открытой разработки МПИ следует осуществлять на основе предложенной типизации горнотехнических объектов, учитывающей их размеры, инженерно-геологические,

гидрогеологические и орографические условия, развивающиеся геодинамические процессы.

2. Деформационный мониторинг открытых горных работ должен выполняться комплексом маркшейдерско-геодезических методов, состав которых определяется в зависимости от степени сложности наблюдаемых горнотехнических объектов, и применением космической радарной интерферометрии для выявления потенциально опасных участков деформаций для сложных и особо сложных условий.

3. Площадные измерения деформаций земной поверхности на горных предприятиях в условиях Крайнего Севера наиболее информативно проводить с использованием космической радарной интерферометрии на основе совместного анализа радарных данных, полученных в нескольких частотных диапазонах.

Методы исследования. Комплексный подход к проведению исследования, в состав которого входит анализ научной и нормативно-методической литературы, оценка горно-геологических и физико-географических условий разработки месторождений открытым способом, лабораторные методы исследований, включающие получение и обработку данных космической радарной съемки, натурные наблюдения.

Практическая значимость:

1. Обоснованы состав и программа проведения деформационного мониторинга территорий крупных горных предприятий, осуществляющих открытую добычу полезных ископаемых, на базе разработанной типизации горнотехнических объектов.

2. Обоснована возможность и разработан практический подход к использованию космического радиолокационного зондирования для наблюдения за деформациями поверхности на горных предприятиях в условиях Крайнего Севера.

Разработанная методика применения космического радиолокационного зондирования может быть использована горными предприятиями и научно-исследовательскими организациями для выполнения деформационного мониторинга объектов открытой разработки месторождений, а также учебными учреждениями для освоения дистанционных методов наблюдения за деформациями земной поверхности.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается: согласованностью данных исследований с нормативными документами по безопасности формирования горнотехнических сооружений открытой разработки МПИ; применением современных методов и компьютерных технологий обработки радарных снимков; сходимостью результатов исследований с натурными наблюдениями на карьере «Центральный» АО «Апатит».

Апробация работы. Содержание и основные положения диссертационной работы были представлены на научно-практических конференциях: Международной научно-практической конференции «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения» (СПбГУ, 2015, 2017), Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в рамках Большого географического фестиваля (СПбГУ, 2015, 2016, 2018), II Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» (Красноярск, СФУ, 2015), XIII Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы ДЗЗ из космоса» (Москва, ИКИ РАН, 2015), конференции «Открытые ГИС 2015» (Москва, 2015), Международном форуме-конкурсе молодых ученых «Проблемы недропользования» (СПГУ, 2016), 9-я конференции «Информационные технологии в управлении» (СПб, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016), XII Всероссийской научно-практической конференции «Новые технологии при недропользовании» (СПГУ, 2016); Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2017» (МГГУ, 2017), 6-й международной научной конференции «Computer Science On-line Conference 2017», Международном конкурсе докладов молодых ученых «Young Person's Lecture Competition Russia Final 2017» (СПГУ, 2017), 55-й международной студенческой научной конференции (Краковская горно-металлургическая академия, 2014), 66-м международном форуме горняков и металлургов (Фрайбергская горная академия, 2015).

Личный вклад автора: постановка цели и задач исследований; разработка типизации горнотехнических объектов и методики деформационного мониторинга горного предприятия с использованием космического радиолокационного зондирования;

организация и выполнение мониторинга деформаций на карьере «Центральный»; анализ и интерпретация результатов исследований.

Реализация результатов работы. Полученные результаты могут быть использованы при анализе деформаций земной поверхности и разработке рекомендаций по ведению деформационного мониторинга горнотехнических объектов на территории карьера «Центральный» АО «Апатит».

Публикации. По теме работы опубликовано 13 печатных трудов, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки России, и 1 статья в журнале, индексируемом Scopus.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Работа изложена на 155 страницах текста и сопровождается 23 иллюстрациями, 29 таблицами, 3 приложениями. Список цитируемой литературы включает 108 наименований.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н. Цирелю С.В., к.т.н. Таратинскому Г.М., д.т.н. Шабарову А.Н., д.т.н. профессору Кутепову Ю.И., д.т.н., ст.н.с. Мустафину М.Г., к.т.н. Жукову Г.П. за содействие в проведении лабораторных исследований и обсуждении отдельных положений работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель, идея, задачи, научная новизна, защищаемые положения, практическая значимость проводимого исследования и личный вклад автора.

В **первой главе** выполнен анализ изученности проблемы организации ДМ при разработке месторождений открытым способом, рассмотрены современные методы мониторинга деформаций земной поверхности на ТПП.

Во **второй главе** разработана типизация объектов горных предприятий при открытой разработке МПИ, проанализированы инженерно-геологические, горно-геологические и гидрогеологические условия открытой разработки месторождения Плато Расвумчорр, выполнена типизация объектов карьера «Центральный».

В третьей главе разработана методика ДМ ТГП в зависимости от сложности горнотехнических объектов.

В четвертой главе приведена методика обработки космических радарных данных для решения задач ДМ, с использованием метода радарной интерферометрии определены и проанализированы деформации на территории карьера «Центральный».

В заключении сформулированы ключевые научные и практические выводы работы.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях.

1. Обоснование деформационного мониторинга территорий горных предприятий открытой разработки МПИ следует осуществлять на основе предложенной типизации горнотехнических объектов, учитывающей их размеры, инженерно-геологические, гидрогеологические и орографические условия, развивающиеся геодинамические процессы.

Сочетания нескольких взаимодействующих горнотехнических объектов и их комбинации в пределах определенного горного предприятия формируют природно-технические системы (ПТС) локального и детального уровней, требующие выполнения комплексного ДМ. Для того, чтобы увязать программу мониторинга с характеристиками наблюдаемых объектов, разработана типизация основных горнотехнических объектов открытых разработок - карьеров и отвалов. Для выбранных горнотехнических объектов выделены показатели, которые соответствуют инженерно-геологическим, гидрогеологическим, физико-географическим и горнотехническим факторам, влияющим на устойчивость данных объектов (таблица 1, рисунок 1).

Анализ инженерно-геологических условий выполняется на основе определения типа горных пород, деформационных процессов, прочности основания сооружения (для отвалов). Для оценки горнотехнических условий анализируются конструктивные особенности объектов - глубина карьеров и высота отвалов, наклон основания отвалов. Оценка гидрогеологических условий дается на основе анализа степени обводненности карьеров и наличия водоносных горизонтов в отвалах. Для характеристики физико-

географических условий ТГП используются следующие признаки: сейсмичность территории, форма и высота рельефа, наличие климатических факторов, усиливающих деформации горнотехнических объектов.

Сложность горнотехнического объекта определяется набором выделенных показателей, оценивание которых выполнено с использованием балльного метода экспертных оценок. Для учета комплексного влияния отдельных показателей выполнен многокритериальный анализ сложности горнотехнических объектов. В результате получено количественное выражение сложности объектов. Диапазон значений сложности горнотехнических объектов разделен на 4 класса: простые объекты, объекты средней сложности, сложные и особо сложные объекты (таблица 2).

Разработанная типизация апробирована применительно к объектам открытой разработки месторождения Плато Расвумчорр – карьере «Центральный» и отвалу №11. Месторождение сложено преимущественно крепкими скальными трещиноватыми породами. Горные работы достигают отметки +460 м – на западном фланге месторождения по южному борту, +550 м – в центральной части, +685 м – в восточном торце. Высота разрабатываемых уступов составляет 15 м с углом наклона в среднем 75° . Гидрогеологические условия отработки карьера средней сложности. Поступление воды в карьер происходит за счет атмосферных осадков, сезонных вод и подземных вод основного водоносного горизонта кристаллических пород. Наиболее распространенными видами деформаций являются осыпи, локальные обрушения и вывалы, периодически происходят осыпания мелких камней. Вскрышные породы транспортируются в 6 отвалов, имеющих различное местоположение относительно карьера. Отвал №11, расположенный на северном борту карьера, отсыпан скальными породами до высоты 450 м, характеризуется прочным, но наклонным основанием, послойной заснеженностью. К характерным деформационным процессам относятся оползни надподошвенные и подошвенные.

Хибинский массив, к которому приурочено месторождение Плато Расвумчорр, представлен сильно расчлененной возвышенностью, относительные высоты находятся в пределах 500-700 м. Для территории месторождения характерна достаточно высокая сейсмичность, в первую очередь техногенного и природно-

техногенного происхождения. Особенности климатических условий: длительная зима, специфический световой режим Заполярья (полярная ночь и полярный день), большое количество осадков, отрицательные среднегодовые температуры воздуха, продолжительные морозы и, как следствие, глубокое промерзание пород и продолжительное залегание снежного покрова. Перечисленные факторы не только снижают устойчивость горнотехнических объектов, но и существенно ограничивают возможности проведения наземных инструментальных наблюдений.

По результатам подробного анализа горно-геологических, гидрогеологических, инженерно-геологических и физико-географических условий разработки карьер «Центральный» отнесен к числу сложных объектов, отвал №11 – к объектам средней сложности (таблица 2).

2. Деформационный мониторинг открытых горных работ должен выполняться комплексом маркшейдерско-геодезических методов, состав которых определяется в зависимости от степени сложности наблюдаемых горнотехнических объектов, и применением космической радарной интерферометрии для выявления потенциально опасных участков деформаций для сложных и особо сложных условий.

К ключевым задачам организации эффективной системы ДМ относится определение методов наблюдения объектов горного предприятия. Решение этой задачи предлагается осуществить на основе разработанной типизации горнотехнических объектов на ТГП таким образом, что выбор методов основан, с одной стороны, на сложности наблюдаемого объекта, а с другой стороны – на особенностях и технических характеристиках применяемых методов мониторинга.

Обоснование выбора комплекса ДМ предлагается выполнить, используя классификацию методов по следующим признакам: - по способу измерений - контактные и дистанционные методы; - по пространственному охвату наблюдений - площадные и точечные методы; - по степени автоматизации наблюдений - неавтоматизированные, автоматизированные и автоматические методы. В качестве основных методов ДМ рассматриваются

наземные инструментальные маркшейдерские наблюдения, технологии глобальных навигационных спутников систем (ГНСС), наземное лазерное сканирование, аэрофотосъёмка, съёмка наземным радаром, космическое радиолокационное зондирование. К числу дополнительных методов относятся визуальные наблюдения и дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) из космоса в оптическом диапазоне.

Чем выше степень сложности объектов, тем более важными являются следующие требования к мониторингу деформаций: высокая степень автоматизации методов, минимальное присутствие человека на опасных участках, применение преимущественно площадных методов, связанные с риском возникновения опасных разрушающих деформаций и необходимостью получения наиболее полной картины деформационных процессов на территории. Базовый принцип определения методики наблюдений заключается в следующем - по мере повышения уровня сложности объектов на ТГП расширяется комплекс проводимых наблюдений, степень их автоматизации и пространственный охват съёмки (таблицы 3-4):

1. Простые объекты контролируются с использованием визуальных методов. В особых случаях, обоснованных проектами, возможно применение инструментальных наблюдений.

2. Контроль объектов средней сложности осуществляется с использованием наземных инструментальных маркшейдерских наблюдений и визуальных методов.

3. Мониторинг сложных объектов выполняется на основе наземных контактных автоматизированных методов и дистанционных площадных методов (космическая радарная съёмка / аэрофотосъёмка). В качестве базового метода постоянного площадного контроля деформаций рекомендуется использовать радиолокационное ДЗЗ из космоса. Для мониторинга качественных показателей земной поверхности и дополнительного контроля объектов инфраструктуры применяется оптическое ДЗЗ.

4. Для мониторинга объектов особой сложности применяется все доступные способы автоматических дистанционных площадных наблюдений. В качестве базового метода постоянного площадного контроля используется радиолокационное ДЗЗ. Мониторинг качественных показателей земной поверхности и контроль объектов

инфраструктуры базируется на данных оптического ДЗЗ высокого пространственного разрешения.

Таким образом, космическая радиолокация используется при площадных измерениях деформаций на сложных и особо сложных объектах, позволяя проследить развитие деформационных процессов и выделить те участки, на которых требуется проведение более детальных локальных инструментальных наблюдений.

По результатам выполненной типизации карьера «Центральный» и в соответствии с предложенным подходом к ДМ, деформационные наблюдения на данной ТГП, с учётом сложности расположенных на ней объектов, рекомендуется выполнять следующим образом:

1. Карьер (сложный объект) необходимо контролировать с помощью площадных автоматизированных дистанционных методов для определения величин, скорости, направления деформаций. Определение качественных показателей следует выполнять с помощью визуальных и дистанционных методов.

2. Отвал (объект средней сложности) необходимо наблюдать с использованием наземных инструментальных маркшейдерских съёмок - для определения количественных показателей, и визуальных методов - для определения качественных показателей.

3. Площадные измерения деформаций земной поверхности на горных предприятиях в условиях Крайнего Севера наиболее информативно проводить с использованием космической радарной интерферометрии на основе совместного анализа радарных данных, полученных в нескольких частотных диапазонах.

Разработанная методика применения данных КРЗ для решения задач ДМ ТГП включает обоснование требований и рекомендации к основным этапам проведения радиолокационного мониторинга: радарной съёмке территории, интерферометрической обработке полученных радарных снимков, определению и анализу деформаций земной поверхности. В работе сформулированы рекомендации по подбору исходных данных: - радарных снимков в соответствии с их ключевыми характеристиками (диапазоном волн и режимом съёмки радарного космического аппарата (КА), поляризацией, пространственным разрешением и уровнем обработки

радиолокационного изображения); - дополнительных материалов (цифровых моделей рельефа, данных ДЗЗ в оптическом диапазоне); - программного обеспечения (ПО).

На основе анализа современных методов обработки радарных снимков и их программной реализации сформулирована последовательность обработки данных, включающая 4 этапа: выбор и загрузку данных; интерферометрическую обработку с целью определения деформаций; постобработку данных и визуализацию результатов (построение карт деформаций земной поверхности). В качестве исходных данных использованы серии радарных снимков с КА ALOS PALSAR (19 снимков, 01.2007-03.2011), TerraSAR-X (16 снимков, 07.2015-09.2016) и Sentinel-1 (6 снимков, 11.08.2015-28.09.2015). Для обработки данных ALOS PALSAR и TerraSAR-X использовано ПО ENVISARscape. Обработка данных Sentinel-1 выполнена в ПО SNAP.

Результат обработки снимков с КА ALOS PALSAR позволил: определить деформации по данным, разделенным длительным временным промежутком; оценить временную изменчивость деформаций земной поверхности на исследуемой ТГП; определить границы временного интервала, в течение которого возможно проведение радарного ДМ, подтвердив полную непригодность использования данных, полученных при наличии даже небольшого снежного покрова; выбрать параметры последующей радарной съёмки (рисунки 2-3).

Результаты обработки данных TerraSAR-X и Sentinel-1 позволили выявить участки оседаний и поднятий на территории карьера «Центральный» (рисунки 4-5). Детальный анализ деформаций за 2015-2016 годы показал, что наиболее интенсивные оседания затронули часть северо-западного борта, что связано с подземными работами на Расвумчоррском руднике. Вторая массивная зона оседаний сформировалась на насыпной части дороги с карьера «Центральный» на Расвумчоррский рудник, что вызвано естественной усадкой насыпной массы. В северной части карьера выделяется зона оседаний, охватывающая отвал №11, с поднятием в её центральной части, приуроченным к местам складирования горной массы. Зона оседаний в центральной части карьера связана с ведением горных работ. Осадки и пучения в южной части карьера

сформировались на месте старого отвала, деформации которого продолжаются в направлении на юг.

Пространственный охват снимков позволил проанализировать деформации на Коашвинском карьере, для территории которого характерны оседания, связанные с ведением горных работ.

Получение актуальных данных о пространственном положении объектов и анализ их изменений позволяет выявить ложные смещения, которые могут возникнуть при изменении отражательных характеристик поверхности. В этой связи, в качестве дополнительного этапа сформулирована и апробирована методика обработки амплитудной составляющей радарных данных, позволяющая решить задачу крупномасштабного картографирования и мониторинга объектов инфраструктуры ТГП. Для обработки амплитудной информации использованы возможности текстурного анализа, алгоритмы неконтролируемой классификации изображений, методы построения композитных изображений, дешифрирование в ручном и полуавтоматическом режиме. Примененные методы улучшили детальность дешифрирования, повысив точность и достоверность распознавания объектов ТГП. В результате было установлено, что радарные снимки высокого разрешения позволяют выполнить дешифрирование объектов инфраструктуры на ТГП. Разработанная методика может быть использована для обновления большинства элементов содержания крупномасштабных карт ТГП.

По результатам обработки радарных снимков было подтверждено, что данные в L-диапазоне пригодны для выполнения ДМ даже при условии значительного временного промежутка между циклами съёмки, так как L-диапазон является менее чувствительным к изменению свойств подстилающей поверхности в сравнении с С и Х-диапазонами. Данные в Х-диапазоне обеспечивают более высокую точность измерения деформаций при условии сохранения временного базиса и особенно – при использовании радиолокационных изображений высокого пространственного разрешения. Наличие в открытом доступе радарных снимков с КА Sentinel-1 и программных продуктов для их обработки обеспечивает эффективное использование данных С-диапазона для регулярного площадного мониторинга деформаций. Исходя из вышесказанного, а также с учётом специфических климатических условий исследуемой

ТГП, ограничивающих период проведения наблюдений, космический радарный ДМ рекомендуется проводить с применением данных, полученных в нескольких частотных диапазонах: L-диапазон – для оценки деформаций, произошедших за длительный временной период, С-диапазон – для регулярного оперативного получения площадных данных о деформациях, Х-диапазон – для высокоточного расчёта деформаций в пределах одного сезона наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Выполнен анализ маркшейдерско-геодезических методов, применяемых при открытой разработке МПИ для ДМ горнотехнических объектов на ТГП. Установлено, что на современном этапе выполнения ДМ территорий российских горных предприятий, осуществляющих открытую разработку МПИ, использование КРЗ, несмотря на его возможности и преимущества перед другими методами наблюдений, ограничено всего несколькими объектами.

2. Разработана типизация объектов открытой горной разработки по степени сложности, учитывающая конструктивные особенности горнотехнических объектов, тип горных пород, гидрогеологические условия, деформационные процессы, особенности климата и рельефа ТГП. Сложность горнотехнического объекта определяется набором выделенных показателей. Разработанная типизация использована для оценки горнотехнических объектов открытой разработки месторождения Плато Расвумчорр, по результатам которой карьер «Центральный» определен как сложный объект, отвал №11 – объект средней сложности.

3. Обоснован выбор комплекса методов ДМ для каждой категории сложности горнотехнических объектов. Комплекс проводимых наблюдений расширяется с увеличением сложности наблюдаемого объекта - от применения простейших визуальных методов для наблюдения деформаций на простых объектах до автоматических систем дистанционного площадного мониторинга при мониторинге особо сложных объектов.

4. Определено место космического радиолокационного зондирования в системе ДМ – радарная съёмка применяется на сложных и особо сложных объектах в качестве базового метода площадного контроля для выявления участков ТПП, требующих проведения более детальных высокоточных наблюдений. Разработана методика оценки деформаций земной поверхности на ТПП, расположенных в районах Крайнего Севера, по данным КРЗ в нескольких частотных диапазонах. Обоснованы рекомендации по подбору космических радарных данных и выполнению основных этапов их обработки.

5. Разработан метод ДМ, который апробирован на территории открытой разработки Хибинских апатит-нефелиновых месторождений.

6. Составлены рекомендации по проведению наблюдений деформаций земной поверхности на карьере «Центральный» на основе результатов оценки его сложности и разработанного подхода к ДМ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Цирель С.В., Таратинский Г.М., **Пономаренко М.Р.**, Кантемиров Ю.И. Опыт организации мониторинга деформаций земной поверхности в зоне ведения горных работ на предприятиях АО «Апатит» (Мурманская область) с применением метода космической радарной интерферометрии // Маркшейдерский вестник. – 2017. - №5. – С. 57-63.

2. Одабаи-Фард В. В., **Пономаренко М. Р.** Геодинамический мониторинг земной поверхности и объектов горнодобывающей промышленности при помощи метода радарной интерферометрии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. - №11. – С. 59-67.

3. **Ponomarenko M.R.**, Pimanov I.Yu. Processing of SAR amplitude images with posting the results on web server // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2016. - 9(7). – P. 994-1000.

В изданиях, включенных в базу данных Scopus:

4. **Ponomarenko M.R.**, Pimanov I.Yu. Implementation of Synthetic Aperture Radar and Geoinformation Technologies in the Complex

Monitoring and Managing of the Mining Industry Objects // Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 574, Springer International Publishing Switzerland. – P. 291-299.

В прочих изданиях:

5. **Пономаренко М.Р.** Мониторинг деформаций земной поверхности на территории Хибинских месторождений с использованием данных космической радарной съемки // Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в рамках XIV Большого географического фестиваля. – Санкт-Петербург: Свое Издательство, 2018. – С. 639-642.

6. Таратинский Г.М., **Пономаренко М.Р.** Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности на территории Хибинских апатит-нефелиновых месторождений по данным ALOS PALSAR и TerraSAR-X // Сборник материалов II международной научно-практической конференции «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения». Санкт-Петербург – 2017. - С. 68-74.

7. **Пономаренко М.Р.**, Квятковская Е.Е., Таратинский Г.М. Совершенствование методов создания и обновления крупномасштабных карт районов Приполярья и Заполярья с использованием материалов космической радиолокационной съемки // Сборник трудов конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий». Санкт-Петербург. - 2017. - С. 229-233.

8. Васильев М.Ю., Ковязин А.В., Квятковская Е.Е., **Пономаренко М.Р.** Современные аспекты мониторинга деформаций земной поверхности при разработке месторождений открытым способом // Сборник трудов конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий». Санкт-Петербург. - 2017. - С. 283-287.

9. Пиманов И.Ю., **Пономаренко М.Р.** Использование геоинформационных технологий и данных радиолокационной съемки для мониторинга объектов горного производства // Материалы 9-й конференции «Информационные технологии в управлении». Санкт-Петербург. - 2016. - С. 435-439.

10. **Пономаренко М.Р.**, Таратинский Г.М. Мониторинг деформаций земной поверхности в зоне ведения горных работ в

районах Заполярья по данным ALOS PALSAR // Сборник трудов XII Всероссийской научно-практической конференции «Новые технологии при недропользовании». Санкт-Петербург. - 2016. - С. 61-62.

11. **Пономаренко М.Р.** Методы обработки данных спутниковой радарной съемки для решения задач информационного обеспечения горного производства // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения». Санкт-Петербург. - 2015. - С. 37-38.

12. **Пономаренко М.Р.** Совершенствование методики обновления крупномасштабных карт с использованием данных ДЗЗ и ГИС-технологий // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы II Международной научной конференции. Красноярск. – 2015. - С 197-199.

13. **Пономаренко М.Р.** Разработка методов создания крупномасштабных карт с использованием данных дистанционного зондирования и геоинформационных технологий // Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в рамках XI Большого географического фестиваля. - 2015. - С. 476.

Таблица 1 - Классификационные признаки объектов горного предприятия

Открытые горные выработки (карьеры, разрезы)							
Конструктивные особенности - глубина		Тип месторождения по горным породам		Степень обводненности		Разрушения, деформационные процессы и поведение массивов	
Малая (до 40 м)	1	Твердые - скальные (моноклитные)	3	Слабо обводненные и	1	Оползни уступов	3
Сравнительно малая (40-100 м)	3	Твердые - скальные (трещиноватые)	6	необводненные		Оползни на бортах	6
Средняя (100-200 м)	5	Относительно твердые - полускальные	4	Умеренно обводненные	3	Фильтрационные деформации	4
Большая (200-400 м)	7	Рыхлые несвязные	4	Обводненные	7	Вывалы	5
Очень большая (более 400 м)	10	Мягкие несвязные	6	Весьма обводненные	10	Обрушения уступов, топплинг	8
		Особого состояния - мерзлые, плавунные*	1			Обрушения бортов	10
						Осадки и провалы на подработанных подземными горными работами территориях*	10

Горнотехнические сооружения (отвалы)											
Конструктивные особенности - высота		Прочность основания		Наклон основания		Тип техногенных пород		Гидрогеологические условия		Деформационные процессы и поведение массивов	
Низкие (менее 30 м)	2	«Прочное» – прочность основания выше прочности отвальных пород «Слабое» – прочность отвальных пород выше прочности основания «Очень слабое» - представлено породами текучей консистенции	1	Пологое	1	Насыпные из скальных пород	1	Наличие безнапорного водоносного горизонта	3	Осадки, связанные с уплотнением пород	1
Средние (30-100 м)	4			Наклонное (более 5°)	4	Насыпные из полускальных пород	2			Оползни надподшвенные	3
Высокие (100-200 м)	6			Круто наклонное (более 10°)	6	Насыпные из рыхлых несвязных пород	4	Наличие напорного водоносного горизонта в отвале или в его основании	6	Оползни подошвенные	5
Очень высокие (более 200 м)	10		4			Насыпные из мягких несвязных пород	8			Оползни подподшвенные	7
			8			Особого состояния – мерзлые*	1	Наличие нескольких напорных пластов в отвале или в основании	8	Фильтрационные деформации	4
										Отвалы на подработанных подземными горными работами территориях*	10

Продолжение таблицы 1

Территория горного предприятия					
Максимальная интенсивность сейсмических сотрясений		Форма и высота рельефа		Климатические факторы	
≤6	3	Равнины:		Наличие климатических факторов, усиливающих интенсивность выветривания горных пород и снижающие устойчивость горнотехнических сооружений: - резкие изменения температуры воздуха; - ветровая нагрузка; - атмосферные осадки высокой интенсивности; - продолжительные морозы (≤-30°C) и продолжительная жара (≥30 °C); - глубокое промерзание пород; - продолжительное залегание снежного покрова.	1
7	5	– отрицательные (ниже уровня моря);	1		
8	7	– низменные (от 0 до 200 м);	2		
9	8	– возвышенные (от 200 до 500 м);	3		
>9	10	– нагорные (выше 500 м);	4		
		Плоскогорья (от 500 до 1000 м).	5		
		Горы			
		– низкие (до 1000 м);	6		
		– средние (от 1000 до 2000 м);	8		
		– высокие (более 2000 м).	10		

Таблица 2 - Ранжирование горнотехнических объектов по сложности

Объект	Результирующий показатель сложности	Сложность объекта
Карьер/отвал с минимальными значениями всех показателей	0,2	Простой объект
Отвал №11	0,5	Объект средней сложности
Карьер «Центральный»	0,7	Сложный объект
Карьер/отвал с максимальными значениями всех показателей	1,0	Особо сложный объект

Таблица 3 - Выбор методов деформационного мониторинга с учётом их характеристик

Степень сложности объектов	Характеристики методов деформационного мониторинга
Простая	Визуальные
Средняя	Визуальные / Наземные контактные / Точечные / Неавтоматизированные
Сложная	Дистанционные / Площадные / Автоматизированные
Особо сложная	Дистанционные / Площадные / Автоматические

Таблица 4 - Состав комплекса деформационного мониторинга

Методы деформационного мониторинга	Степень сложности объектов			
	Простая	Средняя	Сложная	Особо сложная
Визуальные наблюдения	+	+		
Наземные маркшейдерская съёмка		+	+	
ГНСС-мониторинг		+	+	+
Лазерное сканирование				+
Наземная радарная съёмка				+
Аэрофотосъёмка			+	+
Космическая радарная съёмка			+	+
ДЗЗ из космоса в оптическом диапазоне			+	+



Рисунок 1 - Оценка показателей типизации карьеров

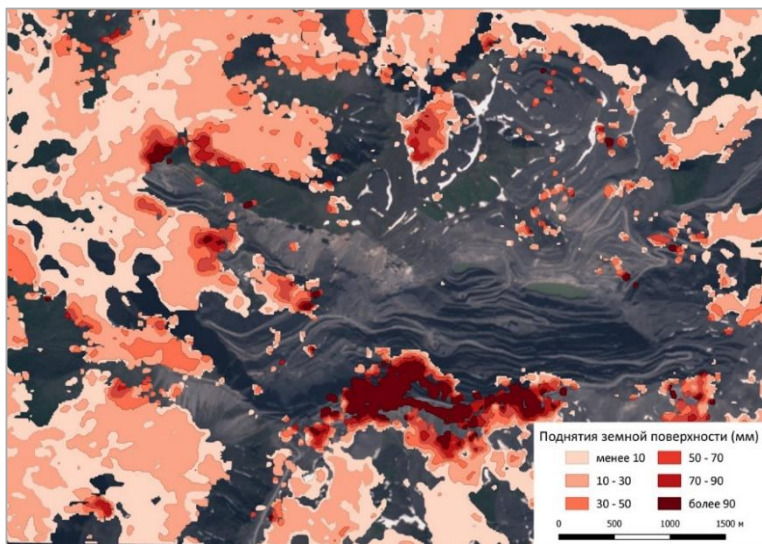


Рисунок 2 - Карта оседаний земной поверхности на территории карьера «Центральный» за период 04.09.2007-12.09.2010 по данным ALOS PALSAR

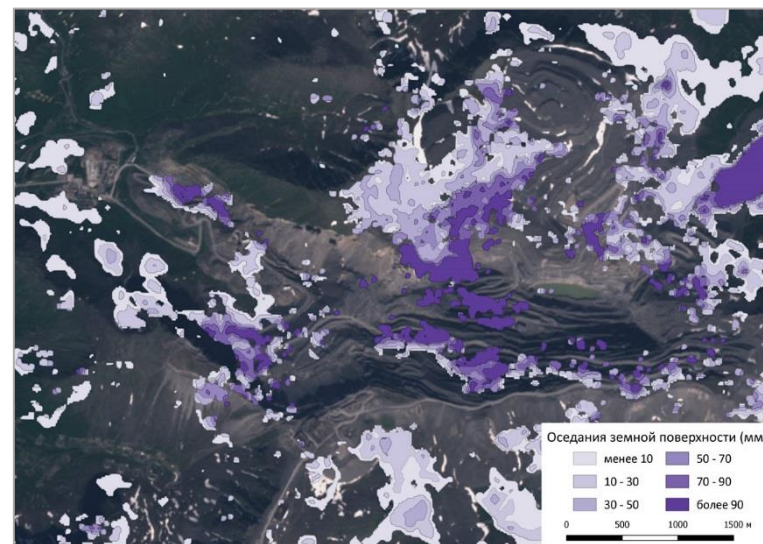


Рисунок 3 - Карта поднятий земной поверхности на территории карьера «Центральный» за период 04.09.2007-12.09.2010 по данным ALOS PALSAR

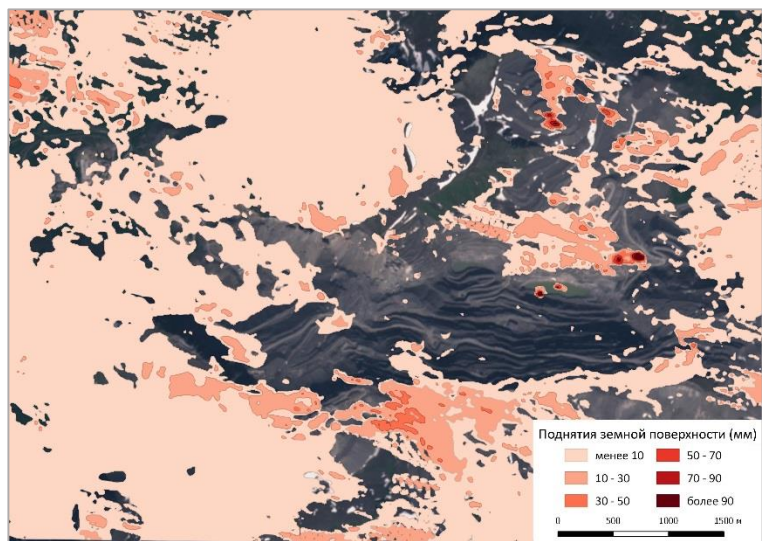


Рисунок 4 - Карта поднятий земной поверхности на территории карьера «Центральный» за период 08.07.2015-23.09.2015 по данным TerraSAR-X

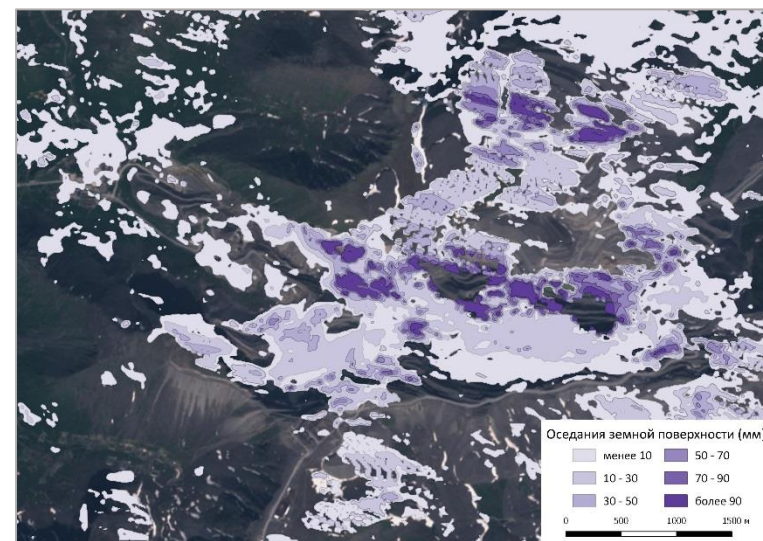


Рисунок 5 - Карта оседаний земной поверхности на территории карьера «Центральный» за период 08.07.2015-23.09.2015 по данным TerraSAR-X