

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

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

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Цирель Сергей Вадимович

Санкт-Петербург – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ИЗУЧЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ	10
1.1 Анализ изученности деформационного мониторинга при разработке месторождений открытым способом	10
1.2 Нормативно-правовая база деформационного мониторинга.....	17
1.3 Особенности открытых горных разработок как объекта деформационного мониторинга	20
1.4 Современные методы деформационного мониторинга	28
1.5 Использование космической радиолокации в горном деле	39
1.6 Цели и задачи исследований	43
ГЛАВА 2 ТИПИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ МПИ	45
2.1 Обоснование критериев типизации объектов	45
2.2 Оценка критериев типизации	54
2.3 Горно-геологические и гидрогеологические условия карьера «Центральный» месторождения Плато Расвумчорр.....	62
2.4 Типизация объектов карьера «Центральный».....	72
2.5 Выводы к главе	74
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ	76
3.1 Комплексный деформационный мониторинг территорий открытой разработки месторождений	76
3.2 Разработка методики комплексного деформационного мониторинга	79
3.3 Требования к производству деформационного мониторинга	83
3.4 Космическое радиолокационное зондирование в системе деформационного мониторинга.....	89
3.5 Мониторинг деформаций земной поверхности на территории карьера «Центральный»	93
3.6 Выводы к главе.....	96
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРИМЕНЕНИЯ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.....	98

4.1 Общие положения	98
4.2 Разработка рекомендаций по подбору данных радиолокационного зондирования	99
4.3 Интерферометрическая обработка радарных снимков	111
4.4 Методика обработки радарных данных для решения задач деформационного мониторинга	114
4.5 Анализ результатов обработки радарных данных	118
4.7 Выводы к главе	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	131
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	134
Приложение А	143
Приложение Б	147
Приложение В	154

ВВЕДЕНИЕ

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 ТТП, 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 ТПП по данным космического радиолокационного зондирования, полученным в L-диапазоне и разделенным 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 конференция 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 «Электро-прибор», 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 деформации 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. профессору Мустафину М.Г., к.т.н. Жукову Г.П. за содействие в проведении лабораторных исследований и обсуждении отдельных положений работы.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ИЗУЧЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

1.1 Анализ изученности деформационного мониторинга при разработке месторождений открытым способом

Необходимость обеспечения непрерывного контроля смещений и деформаций земной поверхности и сооружений на всех стадиях освоения и разработки месторождений в целях контроля взаимовлияния горнотехнических объектов и окружающей среды диктует наблюдениям деформационных процессов организационную форму мониторинга.

Определение мониторинга окружающей среды как системы повторных наблюдений одного и более элементов окружающей природной среды в пространстве и во времени с определенными целями в соответствии с заранее подготовленной программой было введено в 1972 году [1]. В 1974 году это понятие было уточнено Ю.А. Израэлем, обозначившим его как систему не только наблюдений, но также оценки и прогноза, которая позволяет выделить те изменения окружающей среды, которые происходят вследствие человеческой деятельности, т.е. антропогенные изменения [2]. В последующие годы развитие представлений о мониторинге окружающей среды характеризовалось выделением систем (и подсистем) мониторинга по различным признакам, главным образом – в зависимости от объекта наблюдений (рисунок 1) [1]. В частности, в 80-е годы появилось понятие литомониторинга, направленного на изучение литосферы [3]. В то же время введено понятие мониторинга геологической среды, которая, согласно определению Сергеева Е.М. является многокомпонентной динамичной системой, подверженная воздействию инженерно-хозяйственной деятельности человека, направленность которой она в значительной мере определяет [4]. Наблюдения геологической среды выполняются для обеспечения оптимальных экологических условий для человека в рамках определенной природно-технической системы [1].

Природно-техническая система (ПТС) – совокупность инженерного сооружения и части геологической среды в фиксированной зоне его воздействия [3].

Мониторинг геологической среды включает комплексный и частные виды мониторинга, направленные, соответственно, на наблюдения геологической среды в целом и отдельных её элементов в частности. Одним из примеров частного вида мониторинга является геодинамический мониторинг, направленный на изучение экзогенных и эндогенных геологических процессов (рисунок 1) [1].

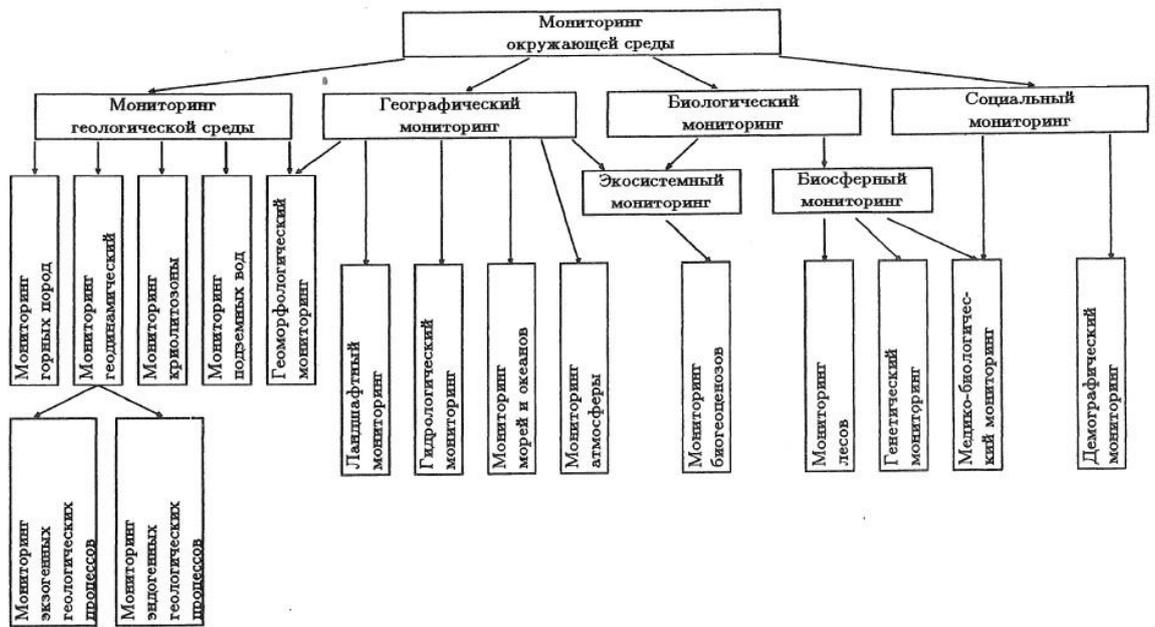


Рисунок 1 - Структура системы мониторинга окружающей среды [1].

На сегодняшний день геодинамический мониторинг рассматривается как система постоянных и/или непрерывных наблюдений, анализа и прогноза современного геодинамического состояния недр, проводимых в соответствии с заданным регламентом в рамках исследуемой ПТС. Геодинамический мониторинг проводится с целью оценки современных аномальных геодинамических - деформационных, сейсмических и флюидогеохимических - процессов природного и техногенного происхождения, а также для анализа риска возникновения негативных, в том числе катастрофических последствий [5].

При этом под геодинамическим процессом понимают процесс деформирования и разрушения массива горных пород, который возникает в

результате изменения его механического состояния под воздействием природных эндогенных и технологических факторов и в ряде случаев достигает земной поверхности.

Геодинамические процессы, как многокомпонентный объект мониторинга, требует применения комплексных методов. Представление результатов их использования осуществляется в 4-х подсистемах (рисунок 2):

- деформационная подсистема содержит данные о современном напряженно-деформационном состоянии;
- геофизическая подсистема включает информацию о вариациях гравитационного, электромагнитного и других геофизических полей;
- сейсмологическая подсистема отражает информацию о сейсмичности объекта;
- флюидо-геохимическая подсистема включает данные о химическом составе и динамическом состоянии флюидных систем.



Рисунок 2 - Структура комплексного геодинамического мониторинга природно-техногенных процессов.

При изучении геодинамических процессов применяют 2 подхода: кинематический и силовой. В первом случае, исследования, выполняемые геодезистами и маркшейдерами, направлены на измерение основных кинематических характеристик движений земной поверхности, таких как смещения, скорости, векторы направленности, с целью реконструкцией исходного поля сил (напряжений). Сторонники силового подхода, к числу которых относятся геологи и геофизики, исследуют механизмы формирования движений в различных геосферах и оценивают кинематические характеристики движений [5].

Помимо геодинамического мониторинга, существует понятие геомеханического мониторинга, направленного на изучения геомеханических процессов, представляющих собой процессы деформирования и разрушения массива горных пород, возникающие в результате влияния природных экзогенных и технологических факторов. Геомеханический мониторинг нацелен на оперативное получение достоверной информации о механических свойствах и природном напряженно-деформированном состоянии массива горных пород, т.е. основным объектом исследований являются деформации горных пород и силы, способствующие возникновению этих процессов. Изучение изменений геомеханического состояния породного массива при освоении недр базируется на результатах маркшейдерских и геодезических измерений наблюдений за деформациями горных пород и земной поверхности. В связи с этим, по аналогии с геодинамическим мониторингом, в системе геомеханического мониторинга можно выделить деформационную подсистему, включающую наблюдения за деформационными процессами, и геофизическую и другие подсистемы, направленные на изучение НДС и закономерностей его изменения (рисунок 3) [6].



Рисунок 3 - Методы и задачи геомеханического контроля на карьерах [6].

Таким образом, можно сделать вывод, что в целом изучение деформационных процессов, обусловленных природными экзогенными и эндогенными факторами, а также происходящих под влиянием техногенной деятельности, включает 2 составляющие: наблюдение деформаций как процесса (измерение величин и иных свойств, фиксирование динамики процессов и т.п.) и изучение состояния горного массива (и/или других объектов), подверженного деформированию. В этом случае деформационный мониторинг является подсистемой геодинамического / геомеханического мониторинга - источником информации о деформациях для их последующего анализа в рамках геодинамического / геомеханического мониторинга. При этом результаты наблюдения деформаций могут быть использованы на различных уровнях систем тематического мониторинга. Рассматривая системы мониторинга с точки зрения масштаба проводимых наблюдений, выделяют несколько иерархических ступеней: от детального уровня (мониторинг конкретного горного предприятия / месторождения / сооружения) до глобального уровня. В частности, геодинамический мониторинг в зависимости от масштаба проводимых наблюдений подразделяется на 3 вида [5]:

1. Региональный мониторинг выполняется для изучения регионального (фонового) сейсмодеоформационного и режима.

2. Зональный мониторинг осуществляется в пределах конкретных сейсмоопасных зон, зон региональных разломов, зон возможного возникновения техногенной и техногенно-индуцированной сейсмичности и деформаций.

3. Локальный мониторинг производится на локальных участках - в очаговых зонах, на территории ПТС и др.

Результаты деформационного мониторинга, в зависимости от используемых методов наблюдений, их масштаба и итоговой генерализации полученных данных, могут быть использованы на каждом из перечисленных уровней.

Исходя из классификации мониторинга разработки месторождений полезных ископаемых в зависимости от используемых методов и средств наблюдений, в качестве одного из видов мониторинга выделяют маркшейдерский контроль. К

числу ключевых функций маркшейдерской службы горного предприятия относится организация и проведение инструментальных наблюдений за процессами сдвижения горных пород, проявлениями горного давления, деформаций земной поверхности, зданий и сооружений, за устойчивостью уступов, бортов карьеров и отвалов [7]. Таким образом, в данном случае ДМ является составной частью маркшейдерского контроля. Наблюдения за деформациями также рассматриваются как комплекс работ, включающий этапы создания наблюдательных сетей, производства измерений и камеральной обработки результатов измерений [7]. В данном случае, акцент делается на используемую в то время методику проведения ДМ, основанную на классических методах наземных инструментальных маркшейдерских наблюдений.

Согласно ГОСТ Р 55535-2013, под термином «деформационный мониторинг» рассматривается более общее, глобальное понятие, а именно: ДМ - междисциплинарная технологическая процедура, направленная на всестороннее исследование динамики изменения формы объектов исследования и причин возникновения смещений и изменения формы с целью обеспечения безопасности жизнедеятельности на контролируемой территории - от экологической безопасности до промышленной безопасности и безопасности зданий и сооружений. Обследование объекта выполняется для оценки его способности противостоять негативному воздействию деформационных процессов и включает определение формы объекта, степени его деформированности, решение задачи оценки подверженности объекта к развитию негативных процессов под действием естественных воздействий [8].

Таким образом, можно сделать вывод, что ДМ, согласно современным представлениям, является составной частью систем мониторинга различной направленности (геодинамического, геомеханического, маркшейдерского и др.), предоставляя пространственные данные о динамике исследуемых процессов. Стоит отметить, что сам термин «деформационный мониторинг» появился относительно недавно, прежде преимущественно использовалось понятие наблюдений за смещениями и деформациями.

Существует ещё одна точка зрения на деформационный мониторинг – ДМ рассматривается как составная часть мониторинга состояния природно-технических систем (МС ПТС). МС ПТС выполняется для обеспечения безопасности функционирования горнопромышленных предприятий. Современный подход к МС ПТС основан на принципах, применяемых для мониторинга безопасности функционирования гидротехнических сооружений (ГТС). Изначально разработанный применительно именно к ГТС, на сегодняшний день этот подход к организации и осуществлению мониторинга постепенно начинают адаптировать и использовать на объектах открытой разработки месторождений. В частности, проведены исследования по разработке научно-методического обеспечения мониторинга состояния природно-технических систем открытой разработки угольных месторождений в Кузбассе [9].

Согласно современному подходу МС ПТС включает следующие этапы:

- наблюдения за параметрами системы на основе сравнения измеренных их значений с обоснованными ранее критериями безопасности;
- накопление и обобщение данных;
- анализ и экспериментальное моделирование процессов;
- прогноз и рекомендации по управлению состоянием ПТС.

В состав работ по МС ПТС входят инженерно-геологические, гидро-геомеханические и маркшейдерско-геодезические наблюдения, в соответствии с которыми МС ПТС подразделяется на 4 вида мониторинга: инженерно-геологический, гидрогеологический, деформационный и технологический мониторинг. Данный подход к организации мониторинга является наиболее рациональным и экономически эффективным для получения информации о безопасности функционирования ПТС [9].

В рамках данного исследования ДМ рассматривается именно как необходимое условие и составная часть МС ПТС, в функции которого в данном случае входят наблюдения за деформациями горнотехнических сооружений, земной поверхности, зданий и сооружений на территории горного предприятия, объектов транспортной сети и других элементов ПТС и окружающей среды [9].

Существует несколько категорий ПТС, выделяемых в зависимости от их пространственного охвата [10]:

- детальные ПТС – сочетания нескольких взаимодействующих горнотехнических объектов;
- локальные ПТС – комбинации горнотехнических объектов в границах одного горного предприятия;
- территориальные ПТС - геолого-экономические горнодобывающие районы или участки месторождения;
- региональные ПТС – отдельное взятое месторождение или бассейн;
- национальные ПТС – определенное направление горнодобывающей промышленности в масштабе отдельной страны;
- глобальная ПТС - определенное направление горнодобывающей промышленности планеты Земля.

Несмотря на то, что, как уже было сказано, результаты измерения деформаций в зависимости от применяемого метода могут быть использованы для осуществления мониторинга различного масштаба, в рамках данной работы ДМ рассматривается преимущественно на уровне локальной и детальной ПТС.

На основании вышеизложенного примем следующее определение ДМ:

Деформационный мониторинг территории горного предприятия (ДМ ТГП) – это наблюдение и измерение величин, скорости и направления деформаций объектов ТГП с целью установления динамики деформационных процессов.

1.2 Нормативно-правовая база деформационного мониторинга

Необходимость выполнения ДМ и требования к его организации регламентируются рядом нормативно-правовых документов. В соответствии с Федеральным законом №116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» объекты, на которых ведутся открытые горные работы, относятся к числу опасных производственных объектов (ОПО), поэтому одним из условий их безопасного функционирования является выполнение специальных мониторинговых наблюдений. Необходимость выполнения

мониторинга деформаций земной поверхности и требования к нему обозначены в ряде нормативно-правовых документов.

В соответствии со статьей 24 Закона Российской Федерации «О недрах» одним из основных требований по обеспечению безопасного ведения работ, связанных с пользованием недрами, является «проведение комплекса геологических, маркшейдерских и иных наблюдений, достаточных для обеспечения нормального технологического цикла работ и прогнозирования опасных ситуаций, своевременное определение и нанесение на планы горных работ опасных зон» [11].

В пункте 537 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» обозначена необходимость осуществления контроля состояния бортов, траншей, уступов, откосов и отвалов, а также зон возможных обвалов или провалов вследствие наличия подземных выработок или карстов [12].

Деформационный мониторинг осуществляет маркшейдерская служба. В соответствии с пунктом 33 «Правил охраны недр» в задачи маркшейдерского обеспечения использования участка недр входит «проведение инструментальных наблюдений за процессами сдвижения горных пород, деформациями земной поверхности, зданий, сооружений, устойчивостью горных выработок» [13].

Пункт 16 «Положения о геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр» в качестве одной из основных функции служб главного геолога и главного маркшейдера определяет «ведение мониторинга состояния недр, включая процессы сдвижения горных пород и земной поверхности, геомеханических и геодинамических процессов при недропользовании в целях предотвращения вредного влияния горных разработок на горные выработки, объекты поверхности и окружающую природную среду» [14].

В соответствии с пунктом 3 Положения «О лицензировании производства маркшейдерских работ» производство маркшейдерских работ среди прочего

включает наблюдения за состоянием горных отводов и обоснование их границ, а также определение опасных зон горных разработок, а также мер по охране горных разработок, зданий, сооружений и природных объектов от воздействия работ, связанных с пользованием недрами, проектирование маркшейдерских работ [15].

Организация работ в рамках ДМ осуществляется в соответствии со следующими документами:

- «Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости» [16];
- «Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости» [17];
- «Инструкция по производству маркшейдерских работ» [18].

ДМ выполняется для решения следующих задач [16]:

- определение границ распространения деформационных процессов;
- выявление типа деформаций земной поверхности и горно-технических объектов;
- установление величины, направления и скорости развития деформационных процессов;
- установление критической величины смещений, предшествующих началу активной стадии процесса деформирования;
- определение причины возникновения деформаций;
- прогнозирование и расчёт степени опасности развития деформационных процессов;
- осуществление контроля за ведением горных работ на деформирующихся участках горного отвода, подверженных деформированию;
- оценка эффективности противодеформационных мероприятий.

Таким образом, можно сделать вывод, что деформационный мониторинг относится к ключевым задачам обеспечения безопасности горного производства и жизнедеятельности населения потенциально опасных районов, снижения

экономических затрат на ликвидацию последствий проявления разрушающих деформаций. На основе данных деформационного мониторинга осуществляется своевременное оповещение персонала горного предприятия и соответствующих служб, сокращающие ущерб, наносимый деформациями, а также принятие оперативных и долгосрочных мер по борьбе с возникающими деформациями и устранению последствий их проявления.

1.3 Особенности открытых горных разработок как объекта деформационного мониторинга

В состав горнодобывающих предприятий, в зависимости от типа добываемых полезных ископаемых, как правило, входят следующие объекты: зона горных разработок (открытых, подземных) / скважин, объекты отвального хозяйства, переработки сырья, транспортные и вспомогательные сооружения, гидротехнические сооружения и др. Таким образом, горнодобывающие предприятия являются комплексным объектом мониторинга. Для эффективного осуществления мониторинга состояния горнодобывающих предприятий как ПТС в целом и выполнения деформационного мониторинга в частности требуется учитывать 2 группы факторов, определяющих влияние горнодобывающего предприятия на геологическую среду: - природные условия месторождения; - способ разработки месторождения.

К природным условиям месторождения относятся геолого-структурный, гидрогеологический, геоморфологический, геодинамический, физико-географический компоненты геологической среды. К числу основных способов разработки месторождений относятся: открытый, подземный, скважинный и геотехнологический.

Открытая разработка месторождений, как самый напряженный с экологической точки зрения способ, наиболее интенсивно воздействует на все компоненты геологической среды. Вследствие ведения открытых горных работ происходят масштабные техногенные изменения ландшафта, меняется НДС массивов горных пород, активизируются деформационные процессы.

Подземный и скважинный способы также влекут за собой нарушения элементов ландшафта, но в меньшей степени, так как открытый способ, как правило, характеризуется значительным площадным охватом ведения работ. Изменения НДС массива горных пород, вызванные открытыми горными работами, также характеризуются широкой зоной распространения. Как следствие, требует применения соответствующих площадных методов для получения наиболее полной картины развития процессов, происходящих на территории горного предприятия.

Открытые горные работы производятся горными предприятиями – карьерами и разрезами - при разработке угольных месторождений. Основными элементами карьера являются рабочие и нерабочие уступы, откосы, верхние и нижние площадки, верхние и нижние бровки. Открытые горные работы ведутся в пределах горного отвода. Карьерное поле и удаляемые при открытой разработке пустые породы, размещенные в отвалы и гидроотвалы, располагаются в границах земельного отвода. Перечисленные горнотехнические сооружения вместе с окружающей их в природной средой формируют ПТС горного типа различных уровней, более подробно описанных в предыдущем подразделе. Каждый из перечисленных объектов открытой горной разработки имеет свои конструктивные особенности, геометрию, конфигурацию, и, как следствие, - характер деформирования и последствия проявления опасных деформаций.

На основных объектах открытой разработки – карьерах и отвалах – согласно классификации Г.Л. Фисенко, выделяют следующие типы деформационных процессов: осыпи, обрушения, оползни, просадки и фильтрационные деформации [17].

Осыпь – отрыв, скатывание или скольжение обломков горных пород в результате выветривания по откосу при угле наклона его больше угла естественного откоса под влиянием гравитационных сил. Осыпь поражает приповерхностную часть крутых откосов, развивается в течение длительного времени и приводит к выполаживанию откосов, разрушению, а иногда и полной

сработке предохранительных и транспортных берм между уступами. Выделяют 2 типа осыпей:

1. Осыпи мягких связных пород, несвязных пород – возникают под влиянием выветривания крутых откосов; осыпание происходит более интенсивно при отсутствии специальной заоткоски уступов.
2. Осыпи трещиноватых твердых пород - возникают под влиянием взрывов и выветривания, при отсутствии заоткоски наклонными скважинами.

Обрушение – отрыв и быстрое смещение вниз горных пород (блоков и пачек пород), слагающих откос, сопровождающееся дроблением смещающегося массива, по поверхности, совпадающей с различного рода нарушениями сплошности массива (крупные трещины, слоистость, тектонические нарушения и т.п.) и залегающей под углом, большим угла трения контактирующих по поверхности отрыва пород, когда, оторвавшись после преодоления сил сцепления, массив не может удерживаться на поверхности отрыва силами трения и смещается вниз к подошве откоса, активная стадия обрушений протекает практически мгновенно. Обрушения представляют собой наибольшую опасность для людей и горного оборудования на карьерах. Обрушения, согласно принятой классификации, бывают 4 видов:

1. Обрушение по подрезанным контактам слоев, дизъюнктивам и сланцеватости - возникает при падении слоев и дизъюнктивных нарушений в сторону выемки круче 25-30°.

2. Обрушение по поверхностям, ослабленным трещинами – возникает при падении трещин в сторону выемки круче 35-40°.

3. Обрушение по криволинейным поверхностям - возникает при завышенных углах или высотах откосов.

4. Обрушение по сложным поверхностям ослабления массива – возникает при наличии в прибортовом массиве сочленяющихся поверхностей ослабления.

Оползень – отрыв и перемещение отделившегося прибортового массива горных пород в виде скользящего движения по пологой поверхности неподвижного массива под влиянием силы тяжести. Наиболее крупный по размерам тип

разрушения бортов карьеров и откосов отвалов. Объемы оползневого тела достигают от нескольких тысяч до десятков и сотен миллионов кубических метров. В ряде случаев оползни приводили к полному прекращению работ на карьере. К основным видам оползней относятся:

1. Оползень изотропных массивов – происходят при обводнении откосов (подток грунтовых вод к откосам и скоплении атмосферных осадков в прибортовой зоне).

2. Оползни покровные – происходят при залегании рыхлых отложений на склоне твердых пород и отсутствии регулирования стока атмосферных и подземных вод.

3. Оползни контактные – происходят при залегании контактов пологозалегających слоев глинистых пород и дизъюнктивных нарушений, заполненных глиной трения; при подрезке контактов, с углами трения меньшими угла их наклона.

4. Надвиги – происходят при наличии в горном массиве слабых контактов или слоев пластичных глин и подрезке контактов или вскрытии слоев.

5. Оползни глубинные слоистых пород лежащего бока – происходят при наличии слоев пластичных глин и напорных вод и углублении карьеров без дренажных работ, обеспечивающих снятие напоров подземных вод.

6. Выпирания – происходят при наличии в подошве бортов карьеров невскрытых слоев пластичных глин.

7. Оползни отвалов надподошвенные - происходят при наличии прочного основания и низких прочностных характеристик отвальной смеси и дополнительном увлажнении отвалов.

8. Оползни отвалов подподошвенные - происходят при наличии слабого контакта отвал-основание.

9. Оползни отвалов подподошвенные (выпирания) – происходят при наличии прочных пород отвала, слабого основания, невскрытых слабых контактов и напорных вод в основании отвала.

Просадки – вертикальное опускание прибортовых участков рыхлых породных масс без образования сплошной поверхности скольжения. Основными видами просадок являются:

1. Просадки пород естественной структуры – возникают при увлажнении (замачивании) высокопористых отложений (лессов, лессовидных суглинков, выщелоченных пород).

2. Просадки пород нарушенной структуры (отвалов) – возникают при уплотнении отвалов рыхлых пород.

3. Просадки пород от влияния подземных горных работ – возникают при подработке прибортового массива подземными горными выработками, например, при совместной отработке месторождений открытым и подземным способом.

Ещё одним видом разрушающих деформаций являются фильтрационные деформации, включающие 7 видов:

1. Оплывание – отрыв, перенос и переотложение грунтовых частиц подземными водами, происходящие при высачивании подземных вод на откос в песчаных и песчано-глинистых породах.

2. Оплывина – перемещение в виде потока насыщенных водой до текучего состояния некоторых разновидностей песчано-глинистых пород нарушенной структуры (пылеватых песков и глин, лессовидных суглинков и лессов), развивающееся довольно интенсивно, часто с катастрофическим характером и возникающие при насыщении водой рыхлых пород и высокопористых отложений, обладающих сцеплением упрочнения, до консистенции текучести.

3. Выпор – разрушение частично подтопленных песчаных откосов, проявляющееся в виде вывала некоторого объёма горных пород под влиянием сил тяжести и гидродинамического давления и возникающие при высачивании на откос подземных вод и высоком градиенте гидродинамического давления.

4. Механическая суффозия – вынос мелких частиц из массива горных пород под влиянием гидродинамических сил в песчаных грунтах с высоким коэффициентом неоднородности.

5. Фильтрационный вынос вдоль трещин – размыв и вынос частиц слабосцементированных пород с характерной трещиноватостью, носящий эрозионный характер и приводящий к образованию подземных пустот и провальных воронок.

6. Поверхностная эрозия – размыв песчано-глинистых рыхлых пород прибортового массива поверхностными потоками атмосферных вод и подземных вод, вытекающих на откос.

7. Выщелачивание и растворение – процесс химической переработки горных пород, связанный с растворением и выносом продуктов растворения подземными водами, приводящий к образованию карстовых полостей.

В случае ведения горных работ комбинированным способом, опасность возникновения разрушающих деформационных процессов усиливается, на земной поверхности возникают следующие зоны деформаций [19]:

1. Зона обрушений и террас – часть мульды сдвижений, где земная поверхность подверглась сдвигению с образованием воронок, провалов, террас и крупных трещин с раскрытием или смещением краев 0.25 м и более.

2. Зона воронкообразования – расположена в центральной части зоны обрушения, в пределах данной зоны выделяют:

– провалы – участки земной поверхности, подвергшиеся обрушению под влиянием подземных горных выработок и в плане имеющие неправильную вытянутую форму; провалы на земной поверхности небольших размеров принято называть воронками.

– первичные воронки – воронки обрушения (провала), образовавшиеся при отработке верхних этажей слепых залежей, до выхода которой земная поверхность ранее не обрушалась; воронка в плане имеет форму, близкую к окружности.

– вторичные воронки – воронки, образовавшиеся в зоне обрушения в результате перепуска в выработанное пространство ранее обрушившихся пород.

3. Зона трещин – часть мульды сдвижения, где земная поверхность подверглась сдвигению с образованием видимых трещин.

4. Зона плавных сдвижений – часть мульды сдвижения, где земная поверхность подверглась сдвижению без разрыва сплошности.

5. Зона опасного влияния подземных выработок – часть мульды сдвижения земной поверхности, где возникают деформации, опасные для зданий, сооружений и природных объектов.

Указанные зоны представлены на рисунке 4, где: А – общая зона влияния горных выработок на земную поверхность; Б – зона опасных сдвижений; В – зона плавных сдвижений; Г – зона трещин; Д – зона обрушения; Е – зона воронок и провалов; 1 – зона беспорядочного обрушения; 2 – область крупных трещин и разломов; 3 – область трещин; 4 – область плавных сдвижений; 5 – область сдвигов по напластованию; 6 – область плавных сдвижений по напластованию.

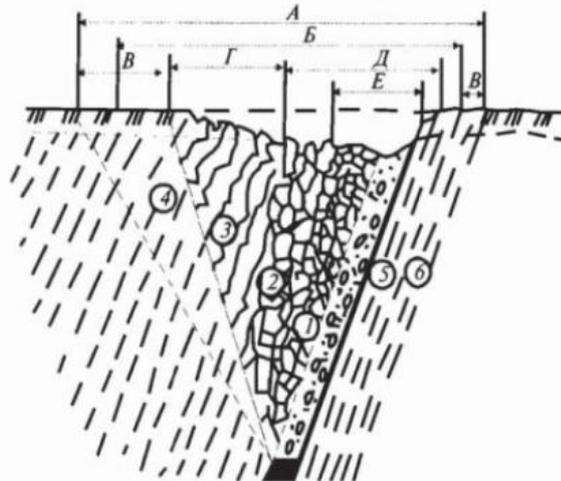


Рисунок 4 - Область влияния горных выработок при полном развитии процесса сдвижения [19].

Исходя из представленных выше классификаций можно сделать вывод о том, что территория ведения открытых горных работ характеризуются наличием большого количества подверженных деформированию опасных участков, на которых, несмотря на существующие риски, необходимо выполнять наблюдения, периодичность которых зависит от вида и характеристик наблюдаемого деформационного процесса.

Важной особенностью зоны ведения открытых горных работ является то, что на объекты открытых разработок в большей степени, в сравнении с объектами

подземной и другими видами добычи, оказывают влияние внешние физико-географические факторы, в частности, климатические условия района месторождения, стимулирующие и усиливающие деформационные процессы. Характер и количество атмосферных осадков, мощность снегового покрова и продолжительность его залегания и таяния влияют на условия обводненности горных пород, устойчивость карьеров и отвалов, состояние объектов транспортной сети. Колебания температурного режима, промерзание пород ведут к разрушению пород на поверхности откосов. В результате попеременного таяния и замерзания воды и, как следствие, изменения её объёма происходит морозное выветривание, также активно разрушающее горные породы [20]. Ещё одним фактором, стимулирующим разрушение пород, являются ветры, их сила, продолжительность и направление.

Таким образом, можно выделить следующие особенности зоны ведения открытых горных работ как объекта мониторинга:

1. Значительная площадь открытых горных выработок и горных предприятий, ведущих добычу открытым способом.
2. Наличие разнородных объектов: карьеры и разрезы, отвалы, гидротехнические сооружения и др.
3. Разнообразие деформационных процессов.
4. Существенное воздействие физико-географических факторов на территорию.

Перечисленные особенности диктуют свои требования к проведению мониторинга деформаций, к числу которых относятся:

1. Большой площадной охват наблюдений.
2. Использование методов, наименее всего подверженных влиянию внешних факторов.
3. Максимальная автоматизация методов наблюдений.
4. Высокая периодичность наблюдений.

На основании перечисленного выделим соответствующие требования к организации ДМ (рисунок 5):

1. Комплексирование методов для сосредоточения деформационных процессов в комбинированные системы наблюдений.
2. Реализация комплексных наблюдений повышенной пространственно-временной детальности в зонах деформаций, где отмечена интенсивная техногенная нагрузка, но при этом существуют условия для проведения высокоточных измерений.
3. Использование преимущественно дистанционных автоматизированных систем наблюдений в зонах активных разрушающих деформаций.

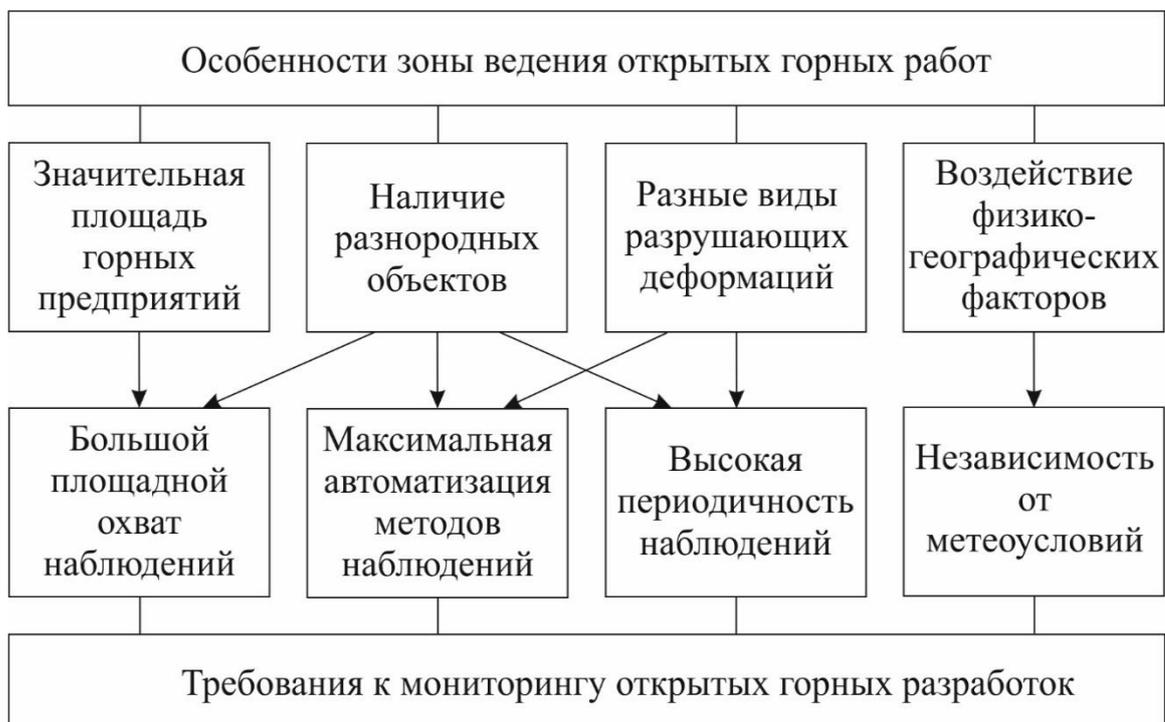


Рисунок 5 - Обоснование требований к мониторингу открытых горных разработок.

1.4 Современные методы деформационного мониторинга

В рамках данного исследования рассматриваются методы геодезического мониторинга деформаций земной поверхности, применяемые для изучения кинематической составляющей характеристик деформационных процессов [8]. На сегодняшний день основными геодезическими методами наблюдения деформаций земной поверхности в зонах ведения открытых горных работ являются: - наземные

инструментальные маркшейдерские наблюдения; - технологии глобальных навигационных спутников систем (ГНСС-технологии); - наземное лазерное сканирование; - аэрофотосъёмка; - съёмка наземным радаром; - космическое радиолокационное зондирование. В дополнение к геодезическим наблюдениям также применяются визуальные наблюдения.

Наземные инструментальные маркшейдерские наблюдения. В состав комплекса работ по производству маркшейдерских наблюдений входит:

1. Создание наблюдательных сетей.
2. Выполнение измерений.
3. Камеральная обработка результатов измерений.

Периодические инструментальные наблюдения проводятся точно на специальных наблюдательных станциях. Структура наблюдательной станции включает несколько профильных линий с расположенными на них опорными и рабочими реперами [16]. Закладка опорных и исходных пунктов наблюдательной сети выполняется вне зоны деформирования. Рабочие реперы закладывают в зонах возникновения деформаций [7]. Для выполнения пространственной привязки реперов наблюдательной станции в горизонтальной плоскости используется метод триангуляции либо прокладываются замкнутые полигонометрические ходы от ближайших доступных пунктов триангуляции / полигонометрии. Для привязки реперов наблюдательной станции по высоте выполняется нивелирование II класса от пунктов триангуляции [16]. Согласно «Методическим указаниям по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости», основными методами наземных инструментальных маркшейдерских наблюдений за деформациями земной поверхности на территории горного отвода являются [17]: - наблюдения по профильным линиям; - геометрическое нивелирование; - створные измерения; - прямые засечки (угловые, линейные); - линейно-угловые засечки; - линейные пространственные засечки; - метод полигонометрических ходов.

На сегодняшний день для производства маркшейдерских наблюдений используются электронные теодолиты, нивелиры и тахеометры. На некоторых

отечественных карьерах в качестве основных средств измерений до сих пор используются оптические приборы. Основным инструментом является электронный тахеометр (Total Station). Измерения с его помощью могут осуществляться как вручную, так и в автоматическом режиме - при использовании роботизированных тахеометров (Robotic Total Stations (RTS)). Основные параметры современных электронных тахеометров и нивелиров представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1 - Тахеометры электронные неавтоматизированные

Модель	Точность угловых измерений	Режим с отражателями (на призму)		Режим без отражателей	
		Точность измерения расстояний	Дальность	Точность измерения расстояний	Дальность
Topcon OS	1"	$\pm 2.0 \text{ мм} + 2.0 \text{ ppm}$	4000 м	$\pm 3.0 \text{ мм} + 2.0 \text{ ppm}$ (0.3 – 200 м)	500 м
Trimble C5	1"	$\pm 2.0 \text{ мм} + 2.0 \text{ ppm}$	5000 м	$\pm 3.0 \text{ мм} + 2.0 \text{ ppm}$	800 м
Sokkia FX	1"	$\pm 2.0 \text{ мм} + 2.0 \text{ ppm}$	4000 м	$\pm 3.0 \text{ мм} + 2.0 \text{ ppm}$ (0.3 – 200 м)	500 м

Таблица 2 - Тахеометры электронные автоматизированные

Модель	Точность угловых измерений	Режим с отражателями		Режим без отражателей	
		Точность измерения расстояний	Дальность	Точность измерения расстояний	Дальность
Topcon GT-1000	1"	$\pm 1.0 \text{ мм} + 2.0 \text{ ppm}$	5000 м	$\pm 2.0 \text{ мм} + 2.0 \text{ ppm}$ (0.3 – 200 м)	1000 м
Trimble SX10	1"	$\pm 1.0 \text{ мм} + 1.5 \text{ ppm}$	-	$\pm 2.0 \text{ мм} + 1.5 \text{ ppm}$	-
Sokkia iX 1000	1"	$\pm 1.0 \text{ мм} + 2.0 \text{ ppm}$	6000 м	$\pm 2.0 \text{ мм} + 2.0 \text{ ppm}$	800 м

Таблица 3 - Электронные нивелиры

Модель	Точность определения высот	Точность определения расстояний	Дальность
Topcon DL	0.6-1.5 мм	-	1.6-100 м
Trimble DiNi	0.3-1.0 мм	20-25 мм (до 20 м)	1.5-100 м
Sokkia SDL1X	0.2 мм	$\pm 10 \text{ мм}$ (до 10 м)	1.6-100 м
Leica NA	1.8-2.5 мм	-	-

Наземные инструментальные наблюдения при достаточной изученности методов и высокой точности измерений характеризуются значительной трудоемкостью и высокой стоимостью проведения работ. Производство съёмок могут ограничить следующие факторы: - погодные условия и состояние атмосферы – влажности воздуха, наличия взвешенных частиц, тумана, ветра, дыма и др.; - продолжительность работы электронных устройств; - недостаточная освещенность поверхности; - наличие удаленных и опасных участков, на которых невозможна установка призм; - особенности структуры поверхности (для режима без отражателей); - вибрации поверхности (характерные для горных работ); - отсутствие видимости до объекта.

Перечисленные факторы значительно снижают периодичность проведения повторных съёмок при организации систематического мониторинга. Существенным недостатком метода является ограниченное количество наблюдаемых точек. Для эффективного использования электронных тахеометров наблюдательная система должна состоять из нескольких устройств и большого числа наблюдательных призм. Производство нивелирования затруднено в условиях пересеченной местности, на глубоких карьерах.

В целом, съёмка профильных линий является недостаточной для построения полной картины деформационных процессов, требующей наличия пунктов наблюдения по всей площади распространения деформаций [21].

ГНСС-мониторинг. ГНСС-мониторинг деформаций основан на многократном переопределении координат пунктов съёмочной сети с использованием ГНСС-приёмников [21]. Определение координат ГНСС-приемника основано на методе линейных засечек, или трилатерации. В качестве опорных пунктов используются космические аппараты (КА) с координатами, известными на любой момент времени. Расстояние до спутников измеряется с помощью приемной аппаратуры на борту КА и на земной поверхности. Расстояние определяется как произведение времени прохождения радиосигнала пути от КА до приемника на поверхности Земли на известную скорость электромагнитных колебаний. Для определения трехмерных координат точки достаточно знать

расстояния до трёх КА. На пересечении трех сфер, образованных расстояниями до КА, будут расположены две точки, одна из которых находится на земной поверхности, а вторая – ложная [22].

В настоящее время действуют следующие глобальные системы: GPS (США), ГЛОНАСС (Россия), Galileo (ЕС), BeiDou (Китай). Для повышения точности измерений на сегодняшний день применяются методы:

- DGNSS (Differential Global Navigation Satellite Systems): базисное расстояние составляет 100-200 км, точность ± 1 м;
- GNSS RTK (Real Time Kinematic): базисное расстояние может достигать 10-20 км при точности ± 2 см [23].

Применение технологий ГНСС для наземных наблюдений позволяет оперативно получать данные независимо от времени года и времени суток. Для выполнения измерений не требуется наличия прямой видимости между точками съемки, наблюдения могут охватывать большие расстояния, что расширяет возможность выбора точек наблюдений в сравнении, например, с нивелированием. Данный метод является точечным, съёмка производится непосредственно на участках возникновения смещений, в связи с чем невозможно получение данных на опасные зоны. Необходимым условием проведения ГНСС-наблюдений является наличие в зоне видимости достаточного количества спутников, что создает трудности при съемке нижних горизонтов глубоких карьеров. Измерения подвержены влиянию ионосферы и тропосферы, могут содержать погрешности из-за неточной синхронизации часов приемника и спутника [22]. Большинство приемников не обеспечивают миллиметровую точность.

Аэрофотосъёмка. На сегодняшний день основным фотограмметрическим инструментом, применяемым для маркшейдерского мониторинга добычи полезных ископаемых открытым способом, являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Это связано с тем, что для традиционных методов аэрофотосъёмки с использованием самолетов и вертолетов характерны высокие экономические затраты и, как следствие, высокая стоимость получаемой продукции [24].

БПЛА позволяют значительно снизить стоимость выполнения аэрофотосъемки территорий площадью до 300 км², линейных объектов. Применение БПЛА исключает наличие риска здоровью экипажа и позволяет выполнять наблюдения поверхности с небольших высот, получая при этом данные высокого пространственного разрешения - на высоте относительно поверхности земли до 100 м детализация изображений достигает 1 см местности на 1 пиксель изображения [25]. Съёмка на высоте ниже уровня облаков дает возможность выполнять наблюдения даже в условиях облачности. В настоящее время технология выполнения аэрофотосъемки с БПЛА отработана на высоком уровне и позволяет оперативно получать аэрофотоснимки для создания и обновления картографической основы территории. Как площадной метод наблюдений, аэрофотосъёмка обеспечивает создание детальных цифровых моделей поверхности.

Аэрофотосъёмка независимо от типа используемых ЛА требует проведения наземных измерений (планово-высотного обоснования), объем которых зависит от особенностей применяемой съёмочной аппаратуры. К числу эксплуатационных ограничений относятся влажность (до 98%), температура воздуха (от - 30° до +55°), скорость ветра (при старте - до 8 м; при посадке - до 4-13 м). Недостатком аэрофотосъемки с БПЛА также является их повышенная аварийность [24].

На сегодняшний момент основное направление применения аэрофотосъёмки в области мониторинга объектов открытой разработки – это расчёт объёмов по вскрыше и добыче при анализе динамики выполнения горных работ. Для решения перечисленных задач преимущественно используются БПЛА типа летающего крыла. Данный тип БПЛА отличается простотой конструкции и эксплуатации. В то же время небольшие размеры и масса летающего крыла снижают его устойчивость при полете [25].

Наземное лазерное сканирование. В процессе наземного лазерного сканирования (НЛС) с высокой скоростью измеряются расстояния от сканера до точек объекта и регистрируются соответствующие направления – вертикальные и горизонтальные углы. Система НЛС выполняет тотальную съёмку объекта, а не

отдельных точек, и результатом работы его трехмерное изображение. При НЛС применяются лазерные дальномеры, в основе работы которых лежат импульсный и фазовый безотражательные методы измерения расстояний, метод прямой угловой засечки. Преимуществами НЛС являются: - возможность трехмерной визуализации объектов в режиме реального времени; - высокая точность измерений; - безопасность исполнителя при съемке на труднодоступных и опасных участках; - высокая производительность полевых работ; - высокая степень детализации результатов сканирования. К недостаткам относятся: - чрезвычайно большой и, как правило, избыточный объем получаемой информации; - высокая стоимость проведения работ; - зависимость от метеоусловий; - ограничения по дальности сканирования [26, 27].

Наземные радарные системы. Принцип работы системы в целом аналогичен работе лазерных сканеров, только вместо лазерного луча используется радиоволновое излучение. В таких системах разрешение данных является функцией от частоты измерений и расстояния между радаром и снимаемой поверхностью откоса. Чем ближе радар расположен к борту карьера, тем меньше пятно луча (или размер пикселя) на измеряемом участке. Радарные системы имеют высокую точность измерений (погрешность до 1 мм, при малых расстояниях – 0.1-0.3 мм). Для высокоточного распознавания деформаций в радарх используются дифференциальные интерферометры, осуществляющие сравнение фаз и интенсивности отраженных сигналов двух последовательных сканирований объекта. В отличие от лазерных сканеров, радары могут использоваться вне зависимости от атмосферных условий (дождь, снег, пыль, задымленность), времени суток и при температурах от -40°C до $+55^{\circ}\text{C}$, что является важным аспектом при работе на открытых разработках. Для применения радаров также не требуется закрепления на откосах отражателей (призм), что значительно упрощает организацию мониторинга и исключает необходимость нахождения персонала в потенциально опасных зонах. Недостатками применения наземных радаров является высокая стоимость оборудования и проведения работ. Наземный радар имеет ограниченный угол обзора и меньшую, в сравнении с космическим, площадь

измерений. Измерения деформаций выполняются относительно «луча визирования». Это наземный метод, подразумевающий выполнение работ на объекте.

Космическое радиолокационное зондирование. Радиолокационная съёмка является активным методом наблюдения: с помощью радарной антенны пространство облучается зондирующим сигналом, затем выполняется приём и обработка отраженного сигнала. На основании отражённого сигнала формируются радиолокационные изображения (РЛИ), которые содержат информацию о различных свойствах объектов зондирования [28].

Для космического радиолокационного зондирования используется часть электромагнитного спектра – сверхвысокочастотный (СВЧ) диапазон – радиоволны длиной от единиц сантиметров до единиц метров и частотой от 10 ГГц до 400 МГц. Для решения задач радиолокационного зондирования земной поверхности применяют космические радиолокаторы L-, С- и Х-диапазонов (таблица 4).

Таблица 4 - Диапазоны частот космических радиолокаторов с синтезированной апертурой [29]

Диапазон ¹	Частоты	Длина волны
L (long)	1-2 ГГц	15-30 см
S (short)	2-4 ГГц	7,50-15 см
C (compromise)	4-8 ГГц	3,75-7,50 см
X	8-12 ГГц	2,50-3,75 см

Основным средством космического радиолокационного зондирования является радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА). РСА – активный когерентный датчик, установленный на борту самолёта или спутника. Принцип работы РСА вкратце заключается в следующих этапах:

1. Передатчик, установленный на борту спутника, формирует зондирующие сигналы.

¹ Обозначения закреплены стандартами IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers (США) и ITU - International Telecommunications Union (международный).

2. С помощью радарной антенны выполняется зондирование поверхности.

3. Отраженные от поверхности сигналы принимаются записываются на специальном устройстве с фиксированием амплитуды и фазы сигнала.

4. Выполняется последовательное когерентное суммирование сигналов, принятых на отрезке полёта.

Определение смещений земной поверхности осуществляется на основе метода радарной интерферометрии, использующего фазовую информацию нескольких циклов когерентных измерений определенного участка земной поверхности с изменением положения радара в пространстве. Технология космической радарной интерферометрии является высокоточным методом прямого определения деформаций поверхности [30]. Точность оценки смещений при использовании технологии интерферометрии постоянных отражателей составляет 2–4 мм по высоте [31]. Космическая радарная съёмка позволяет проводить измерения независимо от естественной освещенности земной поверхности и состояния облачного покрова, получая при этом оперативные данные высокого пространственного разрешения в широкой полосе обзора. Основным же достоинством этого метода являются получение площадных данных для множества точек, расположенных на всей наблюдаемой поверхности, включая опасные и труднодоступные участки. Космическая радиолокация является полностью дистанционным методом, не требующим присутствия на объекте, характеризуется широким пространственным охватом и высокой точностью определения смещений, регулярностью и оперативностью получения данных, возможностью получения «исторических» данных. При этом отсутствует транспортная составляющая, получение и обработка данных проводятся удалённо.

В последние годы радиолокационное зондирование претерпевает интенсивное развитие: увеличивается число спутников, качество и разнообразие получаемых данных, совершенствуются технические характеристики съёмочных систем и методики обработки получаемых данных, постоянно обновляется и разрабатывается новое прогрессивное программное обеспечение для обработки

данных со спутниковых радаров. Кроме того, растёт доля космических радарных данных, предоставляемых в свободном доступе, что расширяет возможности их использования в научных целях.

Сравнительный анализ современных методов деформационного мониторинга. На основе проведенного анализа выполнена систематизация технических средств для производства деформационного мониторинга в зонах ведения открытых горных работ (таблица 5) [32]. Отдельно проанализированы дистанционные методы наблюдения деформаций (рисунок 6) [84].

Таблица 5 - Преимущества и недостатки современных геодезических методов деформационного мониторинга

Метод мониторинга	Достоинства	Недостатки
Наземная маркшейдерская съёмка	– высокая точность определения смещений земной поверхности.	– высокая трудоемкость выполнения работ; – точечный метод; – зависимость от погодных условий времени суток.
ГНСС-технологии	– независимость от погодных условий и времени суток; – высокая точность определения плановых координат; – гибкость в выборе точек съёмки; – короткий временной интервал выполнения наблюдений.	– точечный метод; – необходимость присутствия исполнителя на объекте наблюдений; – ограничения при использовании на низких горизонтах глубоких карьеров.
Аэрофотосъёмка	– площадной метод.	– зависимость от погодных условий и времени суток; – высокая стоимость выполнения работ.
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 её обработки.

Продолжение таблицы 5

Наземные радарные системы	<ul style="list-style-type: none"> – площадной метод; – высокая точность и детализация измерений; – высокая производительность полевых работ; – независимость от погодных условий и времени суток. 	<ul style="list-style-type: none"> – высокая стоимость оборудования; – ограниченный угол обзора съёмочной системы.
Космическое радиолокационное зондирование	<ul style="list-style-type: none"> – независимость от погодных условий и времени суток; – площадной метод; – оперативность и регулярность получения данных; 	<ul style="list-style-type: none"> – точность определения смещений земной поверхности зависит от используемого метода.

	Точность	Временное разрешение	Пространственное разрешение	Плотность точек	Определение геометрии деформаций	Размер области наблюдения	Оперативность	Надежность измерений	Влияние атмосферы	Стоимость
Наземное лазерное сканирование	Yellow	Yellow	Light Green	Green	Yellow	Light Green	Yellow	Light Green	Orange	Orange
Наземные радарные системы	Green	Green	Yellow	Light Green	Orange	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	Orange
Электронные тахеометры отражательные	Green	Light Green	Light Green	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Light Green	Yellow	Yellow
Электронные тахеометры безотражательные	Light Green	Light Green	Light Green	Yellow	Green	Orange	Red	Yellow	Orange	Light Green
Космическая радиолокация	Yellow	Red	Orange	Yellow	Red	Green	Green	Yellow	Orange	Orange
Цифровая фотограмметрия	Orange	Yellow	Yellow	Light Green	Yellow	Light Green	Light Green	Orange	Red	Green
Использование ГНСС-технологий	Light Green	Light Green	Red	Red	Green	Light Green	Green	Light Green	Light Green	Yellow

Очень низкие показатели	Низкие показатели	Средние показатели	Высокие показатели	Очень высокие показатели
-------------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------------

Рисунок 6 - Качественная оценка характеристик дистанционных методов определения деформаций

Выполненный анализ позволяет выделить следующие ключевые особенности космического радиолокационного зондирования:

1. Как активный метод дистанционного зондирования, радиолокационная съёмка не нуждается во внешних источниках излучения, и поэтому она позволяет получать снимки в любое время суток, вне зависимости от освещённости поверхности, даже в условиях полярной ночи. При этом характеристики изображения от времени суток не зависят.

2. Радиоволны, почти не поглощаясь, свободно проходят через облачность и туман. Таким образом, радиолокационная съёмка обеспечивает получение необходимой информации независимо от состояния атмосферы, при любых погодных условиях.

3. Микроволновый радиодиапазон, используемый в радиолокации, и метод радарной интерферометрии позволяют определять вертикальные смещения с высокой точностью (вплоть до нескольких миллиметров).

4. Радиолокационная съёмка является площадным методом наблюдений, обеспечивая широкий пространственный охват и высокое пространственное разрешение получаемых данных.

5. Оперативность и регулярность получения данных (при использовании тандемной съёмки частота получения данных составляет 1-2 суток).

1.5 Использование космической радиолокации в горном деле

Использование радиолокации с целью построения топографических карт впервые было осуществлено Р.М. Голдстейном и Х.А. Зибкером в 1986 году на основе данных РСА, установленного на борту самолёта [85]. Интерферометрическая обработка спутниковых данных, полученных по результатам многопроходной съёмки, впервые была продемонстрирована в работах Ли и Голдштейна в 1987 году и в работе Гэбриэла А.К. и Голдштейна Р.М. в 1988 году [86, 87]. Изначально основным направлением применения радарной интерферометрии была оценка рельефа поверхности. Эксперименты с данными повторных съёмок подтвердили возможность их использования для мониторинга деформаций земной поверхности. Для решения проблемы разделения фазы

рельефа и фазы смещений в 1989 Гэбриэлом А.К. и др. был разработан метод дифференциальной интерферометрии [88]. Первый пример картографирования деформаций земной поверхности представлен в работе Массоннета Д. в 1993 году [89]. Зебкером в 1994 году предложен метод трехпроходной интерферометрии.

В сфере горного дела метод используется с середины 1990-х годов: первые работы были направлены на измерения оседаний земной поверхности на угольных и нефтяных месторождениях Северной Америки и Европы на основе данных ERS и метода DInSAR [90-94].

С начала 2000-х годов география использования метода расширяется – исследования начинают проводиться по всему миру. Этому способствует: - совершенствование технологий интерферометрической обработки, а именно появление методов PS и SBAS [95]; - запуск новых спутников с РСА: ENVISAT/ASAR (2002), ALOS/PALSAR (2006), TerraSAR-X (2007); - создание глобальных цифровых моделей рельефа (ЦМР).

Интерес к интерферометрическим технологиям значительно возрастает в 2014 году, когда на орбиту был выведен спутник Sentinel-1A, данные с которого находятся в открытом доступе. Таким образом, сегодня радарные данные используются на основных этапах разработки и эксплуатации месторождений полезных ископаемых для решения следующих задач: - картографирование рельефа земной поверхности; - мониторинг смещений земной поверхности; - мониторинг деформаций горнотехнических сооружений; - разведка месторождений полезных ископаемых; - создание крупномасштабных карт и планов; - экологический мониторинг; - геологическое картографирование; - мониторинг инфраструктуры; - расчёт объёмов вскрыши и добычи.

Основным направлением неизменно остаётся мониторинг динамики земной поверхности. В качестве исходных данных, как правило, применяются серии снимков, так как на данный момент на большую часть земной поверхности доступны радарные снимки. Обработка выполняется по методам PS и SBAS. Построение ЦМР по данным РСА уже является стандартным инструментом обработки. Проводятся эксперименты по совершенствованию существующих и

созданию новых методов обработки данных многопроходной радарной космической съемки, оценивается их эффективность для зон ведения горных работ [96].

В России мониторинг объектов горнодобывающей промышленности на основе метода радарной интерферометрии начал применяться во второй половине 2000-х годов. В 2007-2010-х годах в ООО ВНИИГАЗ были выполнены исследования территории Заполярного, Уренгойского, Астраханского Южно-Русского месторождений [33-36]. Начиная с 2010 года компанией «Совзонд» был осуществлен радарный мониторинг ряда месторождений, среди которых Уртуйский угольный разрез, Гайский и Лебединский ГОК, а также месторождения Казахстана [37-39]. С участием специалистов ВНИИГАЗ и «Совзонд» подготовлены патенты «Способ мониторинга смещений земной поверхности и деформаций сооружений на территории месторождения полезных ископаемых» и «Способ поиска месторождений углеводородов». Изобретения основаны на использовании метода радарной интерферометрии [40, 41]. На базе Пермского государственного технического университета в 2009-2012 годах выполнен анализ смещений земной поверхности на территории города Березники, а также Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей, Астраханского газоконденсатного месторождения, Жирновского нефтяного месторождения [42-44]. В ЮНИИ ИТ, а в дальнейшем на базе Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта со второй половины 2000-х годов проводятся исследования в области мониторинга Самотлорского месторождения [45]. С участием специалистов ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в 2012 году выполнен мониторинг просадок земной поверхности в местах шахтной добычи угля в Кузбассе [46]. Специалистами Научно-исследовательского института прикладной информатики и математической геофизики Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта выполнен анализ деформаций земной поверхности на территории Ковдорского ГОК и Кольской ГМК [47]. Лидером в области выполнения радарного мониторинга в России является компания «Совзонд»,

осуществляющая наблюдения на большинстве российских месторождений, использующих технологию радарной интерферометрии [39].

Несмотря на ряд успешных проектов в области применения радарной интерферометрии [33-39], использование радарных технологий на российских месторождениях на данный момент ограничено. Это связано с целым рядом факторов. Для мониторинга горнотехнических сооружений и объектов инфраструктуры необходимы высокоточные измерения. Требуемая точность может быть обеспечена только с использованием большого объёма данных высокого пространственного разрешения и специализированного программного обеспечения, стоимость которого значительно высока [48]. Кроме того, далеко не все радарные спутники обеспечивают необходимую для мониторинга поверхности периодичность съёмки [47]. Анализ вертикальных и горизонтальных смещений возможен при наличии данных с разных орбит. Обработка больших серий радиолокационных изображений является продолжительным процессом и предъявляет требования к аппаратному обеспечению, необходимые вычислительные ресурсы не всегда доступны [45].

Значительная часть российских месторождений расположена в северных широтах, для которых характерна существенная неоднородность подстилающей поверхности: наличие снежного покрова, болотистая местность, сезонные изменения растительности отрицательно влияют на когерентность получаемых данных, ограничивают период выполнения измерений и объём используемых снимков. Число глобальных ЦМР, покрывающих заполярные территории, ограничено [33, 49].

Существуют различные взгляды на необходимость проведения дополнительных наземных измерений при выполнении радарного мониторинга земной поверхности. При использовании радарной интерферометрии на российских месторождениях, как правило, требуется также проведение подспутниковых наземных измерений: для предварительной оценки возможностей использования радарной съёмки на конкретном объекте, контроля и верификации результатов, расчёта абсолютных высотных значений. Применение метода

рассеивателей для территорий открытых горных разработок подразумевает дополнительную установку и наблюдение искусственных уголковых отражателей.

Точность определения деформаций поверхности зависит от характера подстилающей поверхности, параметров съёмки, характеристик исходных радарных данных, наличия дополнительных информационных продуктов (опорной ЦМР и др.). Корректная и достоверная оценка точности определения смещений до сих пор остается недостаточно проработанной областью. В связи со всем перечисленными факторами космическая радиолокация находит большее применение для получения площадного представления о динамике земной поверхности [44] и в качестве дополнения классических методов применяется для определения участков, где необходим высокоточный мониторинг.

1.6 Цели и задачи исследований

Систематические наблюдения за состоянием земной поверхности и расположенных на ней объектов в зоне ведения горных работ как при подземном, так и при открытом способе добычи является необходимым условием обеспечения безопасности и эффективности горного производства. Особенности территорий открытых горных разработок диктуют свои требования к проведению деформационного мониторинга. При этом на сегодняшний момент отсутствуют методики выполнения мониторинга деформаций, учитывающих специфику и характеристики объектов в зоне ведения открытых горных работ.

В настоящее время мониторинг деформаций производится с использованием различных методов, самым новым и перспективным из которых является космическое радиолокационное зондирование, которое в последние годы находит все более широкое применение как за рубежом, так и в нашей стране. Однако на данный момент в существующей документации по наблюдению деформаций земной поверхности не учитываются возможности космической радарной съёмки, отсутствуют методики и рекомендации по проведению комплексного деформационного мониторинга открытых горных разработок с использованием космического радиолокационного зондирования. В то же время для эффективного использования космического радиолокационного зондирования для мониторинга

деформаций необходимо отработать существующие методики измерения деформаций и адаптировать их к условиям исследуемых территорий, в частности – месторождений полезных ископаемых, расположенных в Заполярье.

На основании вышеизложенного целью исследования является разработка методики деформационного мониторинга территорий горных предприятий с использованием данных космического радиолокационного зондирования в климатических условиях Севера для обеспечения безопасных условий их функционирования.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

1. Разработка типизации объектов на территории горного предприятия по степени их сложности с учётом их целевого назначения и параметров, инженерно-геологических и гидрогеологических условий, развивающихся геодинамических процессов и явлений.

2. Обоснование выбора комплекса методов для осуществления деформационного мониторинга территорий горных предприятий по результатам оценки сложности и типизации наблюдаемых горнотехнических объектов.

3. Разработка методики применения данных космического радиолокационного зондирования для решения задач деформационного мониторинга территорий открытых горных разработок.

4. Определение величин деформаций земной поверхности и анализ динамики их изменений по результатам обработки радарных снимков, полученных при съёмке в L, C и X-диапазонах.

ГЛАВА 2 ТИПИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ МПИ

2.1 Обоснование критериев типизации объектов

В предыдущей главе было подробно рассмотрено обобщенное понятие ПТС и основные категории ПТС. Как уже было обозначено, основным объектом данного исследования являются ПТС локального и детального уровней, т.е. сочетания нескольких взаимодействующих горнотехнических объектов и их комбинации в пределах определенного горного предприятия. Таким образом, будучи комплексным объектом наблюдений, объекты детальных и локальных ПТС требуют применения соответствующего комплексного подхода к мониторингу. Программа наблюдений должна быть увязана с конструкцией, параметрами и технологией формирования горнотехнических объектов [50]. Эффективность мониторинга различных горнотехнических объектов может быть обеспечена за счёт предварительной классификации этих объектов для более точного определения наиболее подходящих методов их наблюдения и формирования полнофункциональной системы мониторинга.

Существует ряд классификаций объектов открытой горной разработки по технологии ведения работ. Например, классификация систем открытой горной разработки, классификация отвалов при различных системах разработки и др. [60], а также деформационных процессов в зоне ведения открытых горных работ, горных пород по их устойчивости для различных горнотехнических объектов. Однако данные классификации, как правило, направлены на изучение конкретных объектов (карьеров, отвалов) или их элементов и основаны на определенном признаке. Кроме того, классификации, учитывающие конструктивные особенности, часто не соответствуют сегодняшнему состоянию ведения открытых горных работ. Разработка подходов к типизации, включающих единовременный анализ целого набора различных признаков, ведется в данный момент - в частности, сформулирована система критериев для типизации ПТС открытой разработки угольных месторождений для условий «Кедровского разреза» [9].

В рамках данного исследования разработана система критериев для типизации следующих объектов на ТГП:

1. Объекты открытой разработки месторождений (ОРМ) - карьеры и разрезы.
2. Горнотехнические сооружения – отвалы.
3. Гидротехнические сооружения – гидроотвалы, хвостохранилища.

Выбор этих объектов в качестве базовых обусловлен тем, они являются ключевыми при проведении открытых горных работ.

В соответствии с «Правилами обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах» [52], выделяют 4 группы факторов, влияющих на устойчивость бортов разрезов: инженерно-геологические, гидрогеологические, физико-географические и горнотехнические (рисунок 7).



Рисунок 7 - Факторы, влияющие на устойчивость бортов разрезов

С учётом данной классификации для выбранных горнотехнических объектов выделены признаки, соответствующие каждой группе факторов (таблица 6). Анализ инженерно-геологических условий выполняется на основе определения типа горных пород, деформационных процессов, прочности основания (для горно- и гидротехнических сооружений). Для оценки горнотехнических условий дается характеристика конструктивных особенностей объектов и сооружений. В качестве основного признака, используемого для учёта влияния конструктивных

особенностей, выбрана глубина (для карьеров и разрезов) и высота (для горно- и гидротехнических сооружений). При анализе горнотехнических сооружений также учитывается наклон их оснований. Характеристика гидрогеологических условий дается через оценку степени обводненности карьеров (разрезов), анализ наличия водоносных горизонтов для отвалов, гидроотвалов и хвостохранилищ. Для учёта физико-географических факторов ТПП выделена в качестве отдельного объекта анализа, для её характеристики используются следующие признаки: геодинамическая активность (максимальная интенсивность сейсмических сотрясений), характер рельефа, особенности климатических условий.

Таблица 6 - Критерии типизации горнотехнических объектов

Факторы	Горнотехнические объекты и классификационные признаки
Инженерно-геологические	<u>Карьеры и разрезы:</u> – тип месторождений по горным породам; – деформационные процессы и поведение массивов. <u>Отвалы, гидроотвалы и хвостохранилища:</u> – тип техногенных пород; – прочность основания; – тип грунтов основания (для ГТС).
Гидро-геологические	<u>Карьеры и разрезы:</u> степень обводненности. <u>Отвалы, гидроотвалы и хвостохранилища:</u> наличие водоносных горизонтов.
Горно-технические	<u>Карьеры и разрезы:</u> конструктивные особенности – глубина, угол откоса, направление падения борта, коэффициент запаса. <u>Отвалы, гидроотвалы и хвостохранилища:</u> – конструктивные особенности – высота; – наклон основания (для отвалов).
Физико-географические	<u>Территория горного предприятия:</u> – максимальная интенсивность сейсмических сотрясений. – характер рельефа. – климатические факторы.

Карьеры и разрезы

Глубина карьера. На данный момент глубоким принято считать карьер глубиной более 150 м. Помимо общепринятого понятия, существует классификация месторождений по глубине залегания полезного ископаемого [53], предложена систематизация карьеров, включающая их классификацию по глубине и по типам применяемого на них транспортного оборудования [54]. Однако

отсутствует общепринятая типизация карьеров по их глубине, основанная на актуальных данных о разрабатываемых и функционирующих сегодня карьерах. В связи с этим, для описания выбранного признака существующая классификация была дополнена, в результате чего была сформирована шкала глубин карьеров, включающая 5 градаций: - малая (до 40 м); - сравнительно малая (40-100 м); - средняя (100-200 м); - большая (200-400 м); - очень большая (более 400 м).

Тип месторождений по горным породам. В качестве основы для описания признака использована инженерно-геологическая типизация месторождений твердых полезных ископаемых [53], в рамках которой выделено 5 типов месторождений по группам горных пород:

1. Твердые - скальные горные породы.
2. Относительно твердые – полускальные горные породы.
3. Рыхлые несвязные горные породы.
4. Мягкие связные горные породы.
5. Особого состояния – мерзлые горные породы.

Данная типизация была дополнена следующим образом: - твердые скальные породы были разбиты на 2 подтипа – монолитные и трещиноватые; - в группу горных пород особого состояния включены плавунные породы; - полученная группа горных пород особого состояния, включающая мерзлые и плавунные породы, выделена в качестве дополнения к другим группам, поэтому её значение как признака суммируется со значениями других групп. Таким образом, разработана классификация, включающая 6 типов горных пород:

1. Твердые - скальные (монолитные) горные породы.
2. Твердые - скальные (трещиноватые) горные породы.
3. Относительно твердые - полускальные горные породы.
4. Рыхлые несвязные горные породы.
5. Мягкие связные горные породы.
6. Особого состояния - мерзлые и плавунные горные породы.

Деформационные процессы. Выделение типов деформационных процессов выполнено на основе рассмотренной в главе 1 классификации разрушающих

деформаций откосов уступов, бортов карьеров и откосов отвалов, включающей следующие виды деформаций [17]: осыпи, обрушения, оползни, просадки и фильтрационные деформации. Для характеристики деформационных процессов на карьерах и разрезах выделены следующие виды: оползни, фильтрационные деформации, обрушения. Указанная классификация дополнена следующим образом: - выделены 2 подтипа оползней в зависимости от поверхности, к которой приурочена деформация, - оползни на уступах и оползни на бортах; - выделены 2 подтипа обрушений в зависимости от поверхности, к которой приурочено разрушения деформация, - обрушения уступов и обрушения бортов, топплинг; - в отдельную группу вынесены вывалы, а также осадки и провалы на подработанных подземными горными работами территориях [19].

Таким образом, итоговая классификация деформационных процессов на карьерах и разрезах включает: оползни уступов, оползни на бортах, фильтрационные деформации, обрушения бортов, обрушения уступов, топплинг, вывалы, осадки и провалы на подработанных подземными горными работами территориях.

Степень обводненности. Для характеристики гидрогеологических условий карьеров анализируется степень их обводненности. В соответствии с выделенными градациями данного признака различают следующие типы карьеров: - слабо обводненные и необводненные; - умеренно обводненные; - обводненные; - весьма обводненные.

Отвалы

Высота отвала. В соответствии с «Методическими указаниями по расчету устойчивости и несущей способности отвалов» ранее была принята классификация отвалов по высоте, включающая 3 класса: высокие (более 50 м), средние (20-50 м), низкие (менее 20 м) [55]. В связи с развитием технологий и активным ведением отвальных работ данная классификация уже не соответствует действительному состоянию существующих сегодня горнотехнических сооружений. В связи с этим был сформулирован новый вариант классификации, включающий 4 класса: -

низкие (менее 30 м); - средние (30-100 м); - высокие (100-200 м); - очень высокие (более 200 м).

Прочность основания. Для оценки прочности основания отвала приняты следующие градации:

- «прочное» – прочность основания выше прочности отвальных пород;
- «слабое» – прочность отвальных пород выше прочности основания;
- «очень слабое» - представлено водонасыщенными породами текучей консистенции.

Наклон основания. В процессе анализа конструктивных особенностей отвала в случае, если основание отвала наклонное, необходимо учитывать угол его наклона. В «Правилах обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах» выделено 6 классов наклонного основания в зависимости от величины угла наклона: менее 5°, 5-7°, 7-10°, 10-12°, 12-15°, более 15° [52]. Для разрабатываемой в рамках данного исследования типизации на основе обозначенной классификации выделены 3 типа основания: пологое, наклонное (более 5°) и круто наклонное (более 10°).

Тип техногенных пород. За основу характеристики типа техногенных пород отвалов принята инженерно-геологическая типизация месторождений твердых полезных ископаемых [53]. Данная типизация дополнена с учётом типа формируемого техногенного массива – насыпного или намывного, а также выделением в отдельный класс горных пород особого состояния – мерзлых, значение которого суммируется со значением одной из выбранных групп. Таким образом, выделено 7 классов:

1. Насыпные из скальных пород.
2. Насыпные из полускальных пород.
3. Насыпные из рыхлых несвязных пород.
4. Насыпные из мягких несвязных пород.
5. Особого состояния – мерзлые.

Гидрогеологические условия. Оценка гидрогеологических условий производится в соответствии с «Указаниями по методам гидрогеомеханического

обоснования оптимальных параметров гидроотвалов и отвалов на слабых основаниях», в которых выделены 3 категории сложности гидрогеологических условий [50]: - простые, характеризующиеся наличием безнапорного водоносного горизонта; - сложные, для которых характерно наличие напорного водоносного горизонта в отвале или в его основании; - особо сложные, подразумевающие наличие нескольких напорных пластов в отвале или в основании.

Деформационные процессы. По аналогии с характеристикой деформаций на карьерах и разрезах основой классификации деформационных процессов на отвалах послужил материал из «Методических указаний по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости» [17]. Из указанных деформаций для характеристики отвалов были выделены 5 основных видов, которые были также дополнены указанием осадков и провалов на подработанных подземными горными работами территориях: осадки, связанные с уплотнением пород, оползни надподошвенные, оползни подошвенные, оползни подподошвенные, фильтрационные деформации, осадки от сдвижения горных пород при размещении отвалов на подработанных подземными горными работами территориях.

Гидроотвалы и хвостохранилища

Высота сооружений. В соответствии с Постановлением Правительства РФ № 986 «О классификации гидротехнических сооружений» выделены 4 класса сооружений в зависимости от их высоты [56]: - низкие - 4 класс: менее 10 м; - средние - 3 класс: 10-20 м; - высокие - 2 класс: 20-50 м; - очень высокие - 1 класс: более 50 м.

Прочность основания. Оценка прочности основания гидротехнических сооружений выполнена по аналогии с характеристикой оснований отвалов с выделением следующих градаций:

- «прочное» – прочность основания выше прочности отвальных пород;
- «слабое» – прочность отвальных пород выше прочности основания;
- «очень слабое» - представлено водонасыщенными породами текучей консистенции.

Тип грунтов основания. Выделение типов грунтов основания базируется на Постановлении Правительства РФ № 986 «О классификации гидротехнических сооружений» [56]. В соответствии с данным документов классификация включает 3 группы: - А - скальные; - Б - песчаные, крупнообломочные и глинистые в твердом и полутвердом состоянии; - В - глинистые водонасыщенные в пластичном состоянии.

Тип техногенных пород. В качестве основы для характеристики типа техногенных пород гидротехнических сооружений классификация, разработанная на предыдущем этапе исследования для оценки техногенных пород отвалов. С учётом технологии формирования гидротехнических сооружений (намывного техногенного массива), классификация включает только 2 класса: намывные из рыхлых несвязных пород и намывные из мягких несвязных пород.

Деформационные процессы. Ключевые типы деформаций, характерных для гидротехнических сооружений, выделены на основе классификации, представленной в «Методических указаниях по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости» [17]. Для учёта возможного влияния подземных работ при использовании комбинированного метода разработки в отдельной группе указаны ГТС, расположенные на подработанных подземными горными работами территориях – значение данного типа суммируется с другими деформациями, происходящими на объекте. Таким образом, для оценки деформирования выделены 4 типа процессов: осадки, связанные с рассеиванием избыточного порового давления в намывных породах, оползни, фильтрационные деформации, осадки от сдвижения горных пород при размещении ГТС на подработанных подземными горными работами территориях.

Территория горного предприятия

Максимальная интенсивность сейсмических сотрясений. Для оценки геодинамической активности ТПП анализируется общая сейсмичность района. Максимальная интенсивность сейсмических сотрясений в баллах определяется на основе комплекта карт общего сейсмического районирования территории

Российской Федерации (ОСР) [57]. На картах ОСР-2016 указаны степени сейсмической опасности в интервале сейсмической интенсивности от 5 баллов (и менее) до 9 баллов (и более). Эти степени соответствуют вероятностям возможного превышения 10; 5; 1; 0,5% (или вероятностям возможного непревышения 90; 95; 99; 99,5%) в течение 50 лет для максимальных расчетных сейсмических воздействий, указанных на картах ОСР-2016 А, В, С, D соответственно. Значения вероятностей указаны в соответствии со следующими средними интервалами времени между землетрясениями расчетной интенсивности: 500 лет (карта А), 1000 лет (карта В), 5000 лет (карта С) [57]. Степень сейсмической опасности для объектов повышенной ответственности оценивается по картам В и С [58]. Таким образом, в соответствии с ОСР-2016 выделено 6 классов сейсмичности: ≤ 6 , 7, 8, 9, >9 .

Рельеф. В данном исследовании в качестве ключевых характеристик рельефа местности, напрямую влияющих на особенности проведения открытых горных работ, приняты форма и высота рельефа. С учётом классификации, предложенной Мильковым Ф.Н. [59], типизация имеет следующий вид:

1. Равнины: - отрицательные (ниже уровня моря); - низменные (от 0 до 200 м); - возвышенные (от 200 до 500 м); - нагорные (выше 500 м).
2. Плоскогорья (от 500 до 1000 м).
3. Горы: - низкие (до 1000 м); - средние (1000-2000 м); - высокие (более 2000 м).

Климатические факторы. При оценке влияния климатических условий учитываются факторы, усиливающие интенсивность выветривания горных пород, снижающие устойчивость горнотехнических сооружений и стимулирующие активизацию разрушающих деформаций. К числу таких факторов предлагается отнести следующие [60]: - резкие изменения температуры воздуха (10 °С в сутки и более); - ветровая нагрузка; - атмосферные осадки высокой интенсивности; - продолжительные морозы (-30 °С и ниже) и продолжительная жара (30 °С и выше); - глубокое промерзание пород; - продолжительное залегание снежного покрова.

2.2 Оценка критериев типизации

Для оценки разработанных критериев типизации использован подход, основанный на совместном использовании метода нечеткого логического вывода и метода теории планирования эксперимента [61]. Сложность горнотехнического объекта рассматривается как векторное свойство, оценивание которого выполняется с использованием ряда частных показателей, рассмотренных в предыдущем разделе. Перечисленные показатели могут иметь как количественный, так и качественный характер.

Сложность горнотехнического объекта в общем случае оценивается набором показателей $F=\{f_i, i=1,\dots,m\}$. Каждый показатель представляет собой лингвистическую переменную. Термы показателей могут быть заданы интервалами, нечетким числами и т.п. В таблице 7 приведен пример лингвистической шкалы, разработанной применительно к одному из частных показателей (глубине карьера).

Таблица 7 - Лингвистическая шкала показателя

Показатель	Шкала	Терм
Глубина карьера	1. Малая (до 40 м).	1. Низкий.
	2. Сравнительно малая (40-100 м).	2. Ниже среднего.
	3. Средняя (100-200 м).	3. Средний.
	4. Большая (200-400 м).	4. Выше среднего.
	5. Очень большая (более 400 м).	5. Высокий.

В соответствии с используемым подходом определение сложности объектов является задачей многокритериального выбора. Разрешение многокритериальной определенности выполняется с использованием различных методов, как правило, связанных со скаляризацией векторного критерия с использованием различных видов сверток. В то же время данные методы имеют ряд ограничений и недостатков, обусловленных применением сверток. К их числу относятся: - слабая связь весовые коэффициентов, используемых в свертках, с действительной ролью частных показателей сложности объектов как следствие трудностей получения и

обработки экспертной информации; - отсутствие учёта нелинейного характера взаимного влияния показателей и их вклада в обобщенный показатель сложности объектов [61]. Во избежание перечисленных недостатков в данном исследовании предлагается комбинированный метод решения задачи многокритериального оценивания сложности горнотехнических объектов, базирующийся на применении метода нечеткого логического вывода и метода теории планирования эксперимента [61].

Лингвистическая переменная f_i = «Глубина карьера» может принимать значения из множества простых и составных термов $T(f_i) = \{\text{«низкий»}, \text{«ниже среднего»}, \text{«средний»}, \text{«выше среднего»}, \text{«высокий»}\}$ (таблица 7). По аналогии могут быть описаны возможные значения остальных показателей. Экспертная оценка сложности объекта формируется на основе анализа одновременно нескольких показателей с соответствующими значениями термов.

Для результирующего показателя введена лингвистическая переменная «Сложность горнотехнического объекта», которая может принимать следующие значения: $T(f_{рез}) = \{\text{«низкая»}, \text{«ниже среднего»}, \text{«средняя»}, \text{«выше среднего»}, \text{«высокая»}\}$. Мнение эксперта о влиянии частных показателей сложности горнотехнического объекта элемента на результирующую оценку сложности горнотехнического объекта в общем виде описываются следующими продукционными правилами: P_j : «Если $f_1 = A_{1j}$ и $f_2 = A_{2j}$ и ... и $f_m = A_{mj}$, то $f_{рез} = A_{резj}$ », где $A_{ij} \in T(f_i)$, $A_{резj} \in T(f_{рез})$.

Результирующий показатель сложности горнотехнического объекта можно представить в виде полинома, в котором через значения коэффициентов λ_i учитывается влияние отдельно взятых показателей, а также влияние совокупностей показателей (по два - λ_{ij} , три - λ_{ijk} и т.д.):

$$f_{рез} = \lambda_0 + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} f_i f_j + \dots + \lambda_{12\dots m} f_1 f_2 \dots f_m, \quad (1)$$

На начальном этапе выполнена экспертная оценка выделенных показателей с использованием балльного метода экспертных оценок по 10-балльной шкале (таблица 8, рисунок 8). Для построения результирующего показателя сложности значения экспертной оценки всех частных показателей f_i были переведены в шкалу

$[-1, +1]$. Затем была построена и заполнена матрица опроса экспертов с крайними значениями каждого из показателей f_i . Матрица опроса эксперта для анализа сложности карьера ($m=4$) представлена в таблице 9.

Далее был сформирован ортогональный план экспертного опроса. Ортогональный план экспертного опроса для анализа сложности карьера ($m=4$) представлен в таблице 10. Каждому терму частных показателей поставлена в соответствие мода его нечеткого числа: «низкая» — 0,2; «ниже среднего» — 0,45; «средняя» — 0,55; «выше среднего» — 0,75; «высокая» — 1. Усредненные скалярные произведения соответствующих столбцов ортогональной матрицы на вектор дефаззифицируемых значений результирующего показателя представлены в таблице 11. Так, свертка показателей при анализе карьера имеет следующий вид:

$$f_{\text{рез}} = 0,5813 + 0,0875f_1 + 0,0875f_2 + 0,0875f_3 + 0,0875f_4 + 0,00625f_1f_2 + 0,00625f_1f_3 + 0,00625f_1f_4 + 0,00625f_2f_3 + 0,00625f_2f_4 + 0,00625f_3f_4 + 0,125f_1f_2f_3 + 0,125f_1f_2f_4 + 0,125f_1f_3f_4 + 0,125f_2f_3f_4 - 0,01875f_1f_2f_3f_4 \quad (2)$$

В результате получено количественное выражение сложности объектов. Для выделения различных классов сложности были посчитаны значения сложности на основе крайних значений показателей объектов. Полученный диапазон значений сложности был разделен на 4 класса, соответствующих простым, средним, сложным и особо сложным объектам (таблица 12).



Рисунок 8 - Оценка показателей типизации карьеров

Таблица 8 – Показатели 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	1	Оползни уступов	3
Сравнительно малая (40-100 м)	3	Твердые - скальные (трещиноватые)	6	и необводненные		Оползни на бортах	6
		Относительно твердые - полускальные	4	Умеренно обводненные	3	Фильтрационные деформации	4
Средняя (100-200 м)	5					Вывалы	5
Большая (200-400 м)	7	Рыхлые несвязные	4	Обводненные	7	Обрушения уступов, топплинг	8
Очень большая (более 400 м)	10	Мягкие несвязные	6	Весьма обводненные	10	Обрушения бортов	10
		Особого состояния - мерзлые, плавунные*	1			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	1	Пологое	1	Насыпные из скальных пород	1	Наличие безнапорного водоносного горизонта	3	Осадки, связанные с уплотнением пород	1
Средние (30-100 м)	4		4	Наклонное (более 5°)	4	Насыпные из полускальных пород	2	Наличие напорного водоносного горизонта в отвале или в его основании	6	Оползни надподошвенные	3
Высокие (100-200 м)	6	«Слабое» – прочность отвальных пород выше прочности основания	4	Круто наклонное (более 10°)	6	Насыпные из рыхлых несвязных пород	4			Оползни подошвенные	5
Очень высокие (более 200 м)	10		8				Насыпные из мягких несвязных пород	8	Наличие нескольких напорных пластов в отвале или в основании	8	Оползни подподошвенные
						Особого состояния – мерзлые*	1			Фильтрационные деформации	4
										Отвалы на подработанных подземными горными работами территориях*	10

Гидротехнические сооружения (гидроотвалы, хвостохранилища)											
Конструктивные особенности - высота		Прочность основания		Тип грунтов основания		Тип техногенных пород		Гидрогеологические условия		Деформационные процессы и поведение массивов	
Низкие (менее 10 м)	2	«Прочное» – прочность основания выше прочностных отвалных пород	1	Скальные Песчаные, крупнообломочные и глинистые в твердом и полутвердом состоянии	1	Намывные из рыхлых несвязных пород	1	Наличие безнапорного водоносного горизонта	3	Осадки, связанные с рассеиванием избыточного порового давления в намывных породах	3
Средние (10-20 м)	4		4		8		8		6		4
Высокие (20-50 м)	6		8		8		8		8		8
Очень высокие (более 50 м)	8		8		8		8		8		10
		«Слабое» – прочность отвалных пород выше прочностных оснований		Глинистые водонасыщенные в пластичном состоянии		Намывные из мягких несвязных пород		Наличие нескольких напорных пластов		Фильтрационные деформации	
		«Очень слабое» - представлено породами текучей консистенции								Оползни ГТС на подработанных подземными горными работами территориях*	

Территория горного предприятия						
Максимальная интенсивность сейсмических сотрясений		Форма и высота рельефа			Климатические факторы	
≤6	3	Равнины: – отрицательные (ниже уровня моря); – низменные (от 0 до 200 м); – возвышенные (от 200 до 500 м); – нагорные (выше 500 м); Плоскогорья (от 500 до 1000 м). Горы – низкие (до 1000 м); – средние (от 1000 до 2000 м); – высокие (более 2000 м).			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		1	1		
8	7		2	2		
9	8		3	3		
	8		4	4		
>9	10		5	5		
		6	6			
		8	8			
		10	10			

Таблица 9 - Матрица опроса эксперта для анализа сложности карьеров и разрезов

Высказывание	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f _{рез}
1	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий
2	Высокий	Низкий	Низкий	Низкий	Ниже среднего
3	Низкий	Высокий	Низкий	Низкий	Ниже среднего
4	Низкий	Низкий	Высокий	Низкий	Ниже среднего
5	Низкий	Низкий	Низкий	Высокий	Ниже среднего
6	Высокий	Высокий	Низкий	Низкий	Средний
7	Высокий	Низкий	Высокий	Низкий	Средний
8	Высокий	Низкий	Низкий	Высокий	Средний
9	Низкий	Высокий	Высокий	Низкий	Средний
10	Низкий	Высокий	Низкий	Высокий	Средний
11	Низкий	Низкий	Высокий	Высокий	Средний
12	Высокий	Высокий	Высокий	Низкий	Выше среднего
13	Низкий	Высокий	Высокий	Высокий	Выше среднего
14	Высокий	Высокий	Низкий	Высокий	Выше среднего
15	Высокий	Низкий	Высокий	Высокий	Выше среднего
16	Высокий	Высокий	Высокий	Высокий	Высокий

Таблица 10 - Ортогональный план экспертного опроса

	f ₀	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f _{1f2}	f _{1f3}	f _{1f4}	f _{2f3}	f _{2f4}	f _{3f4}	f _{1f2f3}	f _{1f2f4}	f _{1f3f4}	f _{2f3f4}	f _{1f2f3f4}	f _{рез}
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	Низкий
2	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	Ниже среднего
3	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	Ниже среднего
4	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	Ниже среднего
5	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	Ниже среднего
6	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	Средний
7	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	Средний
8	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	Средний
9	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	Средний
10	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	Средний
11	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	Средний
12	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	Выше среднего
13	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	Выше среднего
14	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	Выше среднего
15	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	Выше среднего
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Высокий

Таблица 11 - Результаты вычислений коэффициентов полинома

$f_{0f_{рез}}$	0,2	0,45	0,45	0,45	0,45	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,75	0,75	0,75	0,75	1	0,58125	λ_0
$f_{1f_{рез}}$	-0,2	0,45	-0,45	-0,45	-0,45	0,55	0,55	0,55	-0,55	-0,55	-0,55	0,75	-0,75	0,75	0,75	1	0,0875	λ_1
$f_{2f_{рез}}$	-0,2	-0,45	0,45	-0,45	-0,45	0,55	-0,55	-0,6	0,55	0,55	-0,55	0,75	0,75	0,75	-0,75	1	0,0875	λ_2
$f_{3f_{рез}}$	-0,2	-0,45	-0,45	0,45	-0,45	-0,55	0,55	-0,6	0,55	-0,55	0,55	0,75	0,75	-0,75	0,75	1	0,0875	λ_3
$f_{4f_{рез}}$	-0,2	-0,45	-0,45	-0,45	0,45	-0,55	-0,55	0,55	-0,55	0,55	0,55	-0,75	0,75	0,75	0,75	1	0,0875	λ_4
$f_1f_2f_{рез}$	0,2	-0,45	-0,45	0,45	0,45	0,55	-0,55	-0,6	-0,55	-0,55	0,55	0,75	-0,75	0,75	-0,75	1	0,00625	λ_{12}
$f_1f_3f_{рез}$	0,2	-0,45	0,45	-0,45	0,45	-0,55	0,55	-0,6	-0,55	0,55	-0,55	0,75	-0,75	-0,75	0,75	1	0,00625	λ_{13}
$f_1f_4f_{рез}$	0,2	-0,45	0,45	0,45	-0,45	-0,55	-0,55	0,55	0,55	-0,55	-0,55	-0,75	-0,75	0,75	0,75	1	0,00625	λ_{14}
$f_2f_3f_{рез}$	0,2	0,45	-0,45	-0,45	0,45	-0,55	-0,55	0,55	0,55	-0,55	-0,55	0,75	0,75	-0,75	-0,75	1	0,00625	λ_{23}
$f_2f_4f_{рез}$	0,2	0,45	-0,45	0,45	-0,45	-0,55	0,55	-0,6	-0,55	0,55	-0,55	-0,75	0,75	0,75	-0,75	1	0,00625	λ_{24}
$f_3f_4f_{рез}$	0,2	0,45	0,45	-0,45	-0,45	0,55	-0,55	-0,6	-0,55	-0,55	0,55	-0,75	0,75	-0,75	0,75	1	0,00625	λ_{34}
$f_1f_2f_3f_{рез}$	-0,2	0,45	0,45	0,45	-0,45	-0,55	-0,55	0,55	-0,55	0,55	0,55	0,75	-0,75	-0,75	-0,75	1	0,0125	λ_{123}
$f_1f_2f_4f_{рез}$	-0,2	0,45	0,45	-0,45	0,45	-0,55	0,55	-0,6	0,55	-0,55	0,55	-0,75	-0,75	0,75	-0,75	1	0,0125	λ_{124}
$f_1f_3f_4f_{рез}$	-0,2	0,45	-0,45	0,45	0,45	0,55	-0,55	-0,6	0,55	0,55	-0,55	-0,75	-0,75	-0,75	0,75	1	0,0125	λ_{134}
$f_2f_3f_4f_{рез}$	-0,2	-0,45	0,45	0,45	0,45	0,55	0,55	0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,75	0,75	-0,75	-0,75	1	0,0125	λ_{234}
$f_1f_2f_3f_4f_{рез}$	0,2	-0,45	-0,45	-0,45	-0,45	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	-0,75	-0,75	-0,75	-0,75	1	-0,01875	λ_{1234}
Значения полинома	0,2	0,45	0,45	0,45	0,45	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,75	0,75	0,75	0,75	1	-	

Таблица 12 - Классы объектов по сложности

Результирующий показатель сложности объекта	Класс объектов по сложности
$0,2 \leq f_{рез} < 0,4$	Простой объект
$0,4 \leq f_{рез} < 0,6$	Объект средней сложности
$0,6 \leq f_{рез} < 0,8$	Сложный объект
$0,8 \leq f_{рез} \leq 1,0$	Особо сложный объект

2.3 Горно-геологические и гидрогеологические условия карьера «Центральный» месторождения Плато Расвумчорр

Общие сведения

Месторождение апатит-нефелиновых руд Плато Расвумчорр находится в Кировском районе Мурманской области в 8 км к востоку от г. Кировска. Месторождение расположено в южной части Хибинского щелочного массива, в центральной части Кольского полуострова. Разработка Хибинских апатит-нефелиновых месторождений производится на базе горно-обогатительного комбината «Апатит». Предприятие расположено в Мурманской области, в городе Кировске. АО «Апатит» входит в состав группы «ФосАгро» и является крупнейшим в мире предприятием по производству апатитового концентрата [62]. Предприятие ведёт открытую и подземную разработку отработку 12 месторождений, расположенных в центральной части Кольского полуострова в пределах Хибинского горного массива.

Месторождение Плато Расвумчорр открыто в 1923 году, с 1964 года разрабатывается открытым способом Центральным рудником ОАО «Апатит», с 1997 г. начата подземная отработка запасов северо-западного фланга месторождения Расвумчоррским подземным рудником. На западе месторождение соприкасается по условной границе с месторождением Апатитовый Цирк. Согласно лицензиям, выданным ОАО «Апатит» на право отработки запасов месторождения, МУР №10853ТЭ и МУР №00468 ТЭ добычи апатит-нефелиновых руд ведется до полного выклинивания рудной залежи абсолютных отметках +350 м - 100 м, совпадающих с нижней границей подсчета запасов промышленных категорий [63].

Рельеф района месторождения

Хибинский массив, к которому приурочено месторождение Плато Расвумчорр, представлен сильно расчлененной горной возвышенностью, его площадь составляет 1327 км². Высшая точка массива - гора Юдычвумчорр (гора Ферсмана), имеющая отметку 1200,6 м. Относительные высоты

Хибинского массива находятся в пределах 500-700 м. Вершины Хибинских гор расположены на высотах 900-1100 м. К характерным элементам рельефа Хибин относятся: - плоские платообразные вершины гор, покрытые каменными россыпями и каменными многоугольниками; - глубокие вытянутые ущелья с отвесными стенками, разделяющие вершины гор; - крутые склоны (тектонические уступы); - гляциальные формы (троговые долины, цирки, кары); - глубокие вытянутые ущелья с отвесными стенками, которые разделяют вершины гор. Цирки и кары занимают значительную площадь массива (около 30%). Цирками заканчиваются большинство верховий крупных рек. Для долин свойственен прямолинейный характер, корытообразный поперечный профиль, незначительная длина (около 10-15 км) [64].

Гидрографическая сеть

Для района Хибин характерна достаточно густая речная сеть, имеющая радиально-концентрический рисунок. Вдоль массива дугообразно расположены глубокие озера. Хибины находятся между двух больших озер – Умбозером (313 км²) и Имандрой (816 км²). Внутри массива на дне долин и каров расположено свыше 30 небольших озер, самыми крупными из которых являются Большой Вудъявр и Пайкунъявр.

Климатические условия

Кольский полуостров расположен в северной атлантико-арктической зоне умеренного пояса, и, за исключением самой южной части, находится за полярным кругом [65]. Особенности климатических условий района Хибин являются [64]: - длительная зима (около 7-8 месяцев, продолжительность зимнего периода увеличивается с высотой); - короткое и прохладное лето; - отрицательные среднегодовые температуры воздуха; - специфический световой режим Заполярья: полярная ночь (14.12-30.12) и полярный день (29.05-15.07); - незначительное количество солнечной радиации; - высокая облачность; - высокая относительная влажность и слабое испарение; - большое количество осадков; - значительные скорости ветра; - неустойчивые погодные

условия; - продолжительность залегания снежного покрова – 200-225 дней в году.

Геологическое строение Хибинского массива

Хибинский массив образован платформенной интрузией центрального типа [66]. Интрузия возникла в результате проникновения магмы по крупным глубинным разломам земной коры вследствие развития глыбовой тектоники [67, 68]. Для массива характерно кольцевое строение в плане. Внутри массив сложен кольцевыми и коническими интрузивными телами. Центры интрузивных тел смещены с юго-запада на северо-восток [67]. Хибинины являются продуктом герцинского орогенеза, абсолютный возраст пород составляет 290 ± 10 млн. лет [68]. Хибинский щелочной массив расположен на контакте метаморфизованных образований архея и протерозоя: архейские породы расположены на севере и юго-востоке, протерозойская толща – на юге и западе [66, 68]. До глубины 3 км контакт массива с вмещающими породами крутой и составляет $70-80^\circ$, ниже выполаживается. Таким образом, по направлению от внешней границы массива к центру последовательно сменяют друг друга следующие породы [66]: массивные хибинит; трахитоидные хибиниты; рисчорриты; ийолит-уртиты; лявочорриты; фойяиты.

Интрузии хибинитов, рисчорритов и лявочорритов в плане имеют серповидную форму, фойяиты образуют центральное ядро массива [66, 67]. На западе все разновидности пород имеют наибольшую мощность, на северо-западе и юго-востоке постепенно сужаются и выклиниваются. Для западного района Хибин характерны более пологие углы падения пород и трахитоидности в сравнении с южными и северными частями массива [66]. Апатитовые руды приурочены к границе между ийолит-уртитами и рисчорритами. Геологическая карта Хибинского щелочного массива представлена на рисунке 9, цифрами обозначены интрузивные комплексы и месторождения: 1 - массивные хибиниты; 2 - трахитоидные хибиниты; 3 - рисчорриты, 4 - трахитоидные ийолиты; 5 - уртиты, 6 - рудные тела, 7 - малиньит-луявриты, полевошпатовые ийолиты; 8 – лявочорриты; 9 -

трахитоидные роговообманковые фойяиты; 10 - трахитоидные эгири-роговообманковые фойяиты; 11 - массивные эгириновые сиениты; 12 - месторождения апатито-нефелиновых руд: 1 – Кукисвумчорр; 2 - Юкспор, 3 - Апатитовый Цирк; 4 – Плато Расвумчорр; 5 – Коашва; 6 – Суолуайв; 7 - Ньоркпахк, 8 - Куэльпор, 9 - Куниок-Лявойок, 10 - Поачвумчорр.

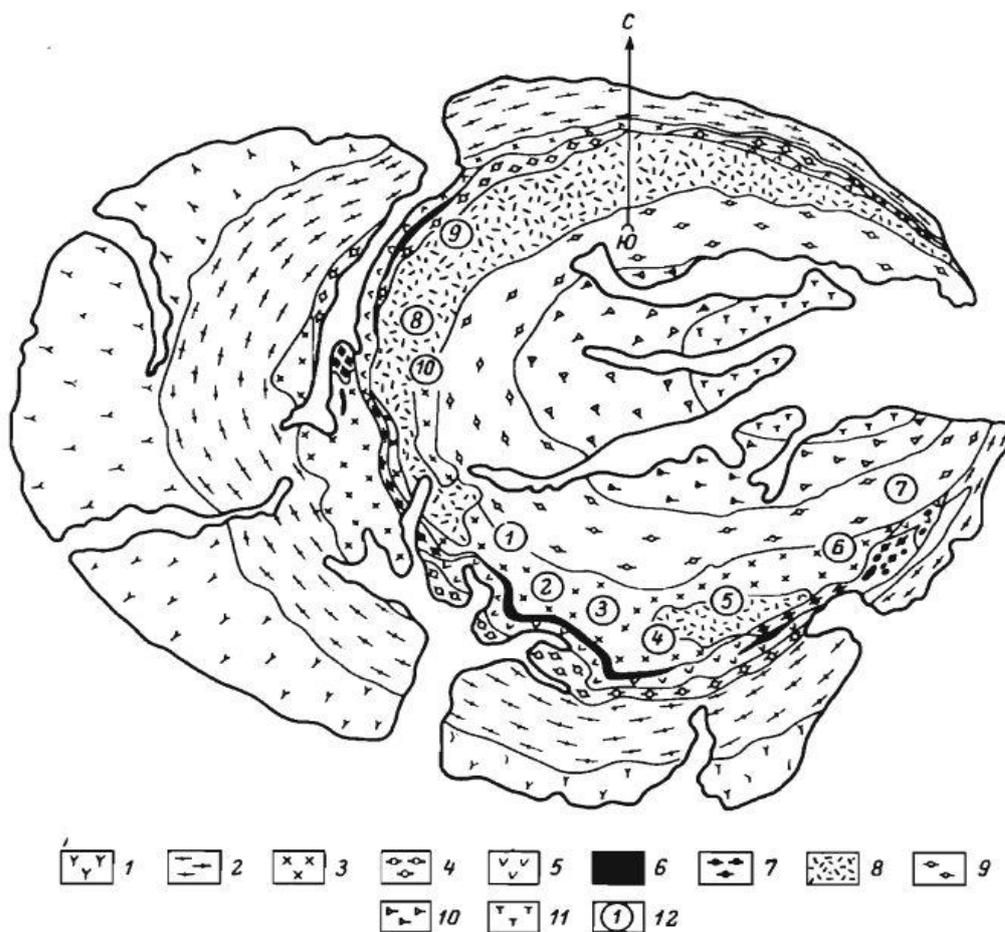


Рисунок 9 - Геологическая карта Хибинского щелочного массива

Тектонические структуры на территории месторождений разнообразны, в пределах рудного поля распространены складчатые и разрывные формы дислокаций как следствие сформировавшихся на разных этапах тектонического развития системы концентрических разломов, проходящих вдоль основных структурных элементов массива в соответствии с его кольцевым строением, и системы региональных радиальных разломов, которая разделила рудное поле и массив в целом на ряд отдельных блоков [66]. По территории Хибинского массива проходят шесть радиальных разломов:

Кукисвумчоррский; Поачвумчоррский; Куэльпорский; Суолуайвский; Ньюркапхский, Коашкарский. Протяженность разломов составляет 10-80 км. Система радиальных разломов сходится в центральной части массива - в районе залива Тульилухт озера Умба, в месте крупного понижения рельефа. От залива разломы расходятся в виде системы радиальных долин. На территории массива и за его границами разломы проходят в пониженных частях рельефа (долинах, перевалах, седловинах, впадинах озер). За пределами массива радиальные разломы соединяются с концентрическими. Характерные формы рельефа Хибин напрямую связаны с системой разломов и блоковыми структурами. С системой диагональных разломов связаны землетрясения вблизи Хибин, имеющие тектоническую природу сейсмичности. Относительно высокая сейсмичность самого Хибинского массива является следствием активной техногенной деятельности: эпицентры землетрясений группируются непосредственно в районе ведения крупномасштабных горных работ [68].

В пределах Хибинского массива выделяются 3 рудных поля [68]:

1. Юго-западное рудное поле, к которому относятся месторождения Кукисвумчорр; Юкспор; Апатитовый цирк и Плато Расвумчорр.
2. Юго-восточное рудное поле, к которому относятся месторождения: Коашва; Ньюркапх; Эвеслогчорр, Олений ручей и Вуоннемйок.
3. Северо-западное рудное поле, к которому относятся месторождения: Поачвумчорр; Куниок-Лявойок; Куэльпор.

Юго-западное поле протянулось в направлении с северо-запада на юго-восток вдоль контакта между рихчорритами и ийолит-уртитамы почти на 12 км. Простираение рудного поля соответствует кольцевому строению массива и меняется от 334° на Кукисвумчорре до 270° на Плато Расвумчорр. Контакт апатитовой залежи и порфиroidных уртитов, подстилающих её на всем протяжении, характеризуется как неровный, извилистый, с постепенными переходами через полосу обогащенных апатитом уртитов. В зависимости от содержания апатита рудные тела можно разделить на две зоны: - богатая зона

– расположена в верхней части рудных тел, образована пятнистыми, пятнисто-полосчатыми и брекчиевидными текстурными разновидностями руд; - бедная зона - расположена в нижней части рудных тел, представлена линзовидно-полосчатыми, сетчатыми, мелкоблоковыми и крупноблоковыми рудами [66].

Юго-восточное поле имеет более сложную морфологию и структуру рудных тел [68]. Так, в пределах Коашвинского месторождения апатит-нефелиновые руды образуют ряд субпараллельных рудных горизонтов среди уртитов [67].

Геологическое строение месторождения Плато Расвумчорр

Месторождение Плато Расвумчорр является одним из крупнейших промышленных месторождений Хибин. Рудное тело выходит на дневную поверхность на горном плато, имеющем отметки от +900 до +1000 м. Рудная залежь представлена пластообразным телом субширотного простирания, падающим на север-северо-восток (азимут 5°). Углы падения рудного тела на всей площади месторождения в интервале абсолютных отметок 500-200 м в среднем составляют $30-35^\circ$; ниже угол падения верхнего контакта рудного тела увеличивается до 40° , а нижнего контакта - уменьшается до $20-25^\circ$. Протяженность рудной зоны по простиранию составляет около 3200 м, по падению – 500-800 м, азимут простирания - 270° . Полного выклинивания рудного тела по падению рудной зоны не установлено.

В строении месторождения выделяются три основные толщи пород: - покрывающая, представленная более древними относительно руды рическорритами и пострудными ийолит-уртитами-малиньитами-луявритами; - рудная, объединяющая апатито-нефелиновые руды, рудную брекчию, сфено-apatитовые руды и апатито-содержащие йолит-уртиты, залегающие в руде и вблизи нее; - подстилающая, состоящая из сингенетичных руде массивных уртитов и позднемагматических неравнозернистых и среднезернистых полевошпатовых уртитов-ювитов рудной субфазы, а также трахитоидных уртитов предположительно дорудной субфазы.

Граница между покрывающими породами и рудной зоной резкая. Комплекс апатит-нефелиновых пород и руд представлен пятнистыми, пятнисто-полосчатыми, линзовидно-полосчатыми, блоковыми, сетчатыми, массивными рудами и массивными уртитам (апатитовыми, с апатитом и безапатитовыми). Каждый тип руд образует в пространстве выдержанный пласт, нередко с маломощными (первые метры) согласными прослоями других типов руд или уртитов.

Гидрогеологические условия месторождения Плато Расвумчорр

Одним из основных факторов, определяющих гидрогеологические условия Хибинского горного массива, является сильно расчлененный горный рельеф и его высокое гипсометрическое положение, что создает благоприятные условия для дренирования кристаллических пород и предопределяет глубокое залегание уровня поверхности трещинных вод и наличие мощной зоны аэрации.

В разрезе месторождения Плато Расвумчорр выделяются три зоны: зона аэрации, зона переменного водонасыщения и зона постоянного водонасыщения, при преимущественном распространении зоны аэрации. Резкое превышение месторождения над долинами ручья Бурового (приток реки Вуоннемйок) и реки Расвумйок (до 450-550 м), текущих с северной и южной сторон месторождения параллельно простиранию рудного тела, определило благоприятные условия отработки запасов месторождения открытым способом. В зоне постоянного водонасыщения (ниже отметок 550-450 м) на территории месторождения формируется водоносный горизонт трещинных вод кристаллических пород. Водоносность кристаллических пород крайне неравномерна как в площадном, так и в вертикальном разрезе и определяется степенью трещиноватости. В зоне аэрации от поверхности до глубины 35,0-88,0 м (абсолютные отметки 614,5-746,9 м) выделяется сезонный водоносный горизонт типа верховодки, приуроченный к трещинам выветривания и искусственной трещиноватости пород, а также локальным зонам тектонического происхождения. Питание горизонта происходит за счет

атмосферных осадков, в основном в период интенсивного снеготаяния и дождей, дренирующее воздействие на сезонные воды оказывают карьер и рудоспуски. Подземные и поверхностные воды района месторождения близки между собой по химическому составу, характеризующемуся низкой минерализацией. Воды весьма пресные (минерализация не превышает 0,045-0,11 г/л), мягкие (общая жесткость 0,06-0,2 мг/л) и нейтральные до умереннощелочных (рН =7,25-9,0).

Инженерно-геологические условия отработки месторождения

Плато Расвумчорр открытым способом

Месторождение Плато Расвумчорр сложено, в основном, крепкими скальными породами. Рыхлые четвертичные отложения имеют незначительное распространение, малую мощность и на устойчивость бортов карьера не влияют. На территории месторождения выделяются два участка с различными инженерно-геологическими условиями: южный борт (лежащий борт рудной залежи) и северный борт (висячий бок рудной залежи).

Южный борт карьера характеризуется весьма сложными инженерно-геологическими условиями, обусловленными наличием в лежащем боку рудной залежи зоны главного разлома (шпреуштейнизированные зоны). Породы, слагающие борт карьера, представлены крепкими скальными породами: уртитам и апатит-нефелиновыми рудами и слабыми породами зоны шпреуштейнизации. Разлом прослеживается в широтном направлении по всему карьеру южному борту. Мощность зон шпреуштейнизации в зависимости от угла падения разлома различная. В местах пологого (менее 45°) залегания мощность этих зон может достигать десяти и более метров, а в местах крутого падения обычно не более 5 м. Среднюю часть разлома составляют перетертые породы, представленные дроблеными рудами и вскрышными породами, шпреуштейном и цеолитами. Контактные зоны разлома выполнены шпреуштейнизированными уртитам и разрушенной, обохренной слабосцементированной породой.

Северный борт карьера и восточная торцевая его части находятся в более благоприятных инженерно-геологических условиях. В этих районах борта карьера сложены в основном крепкими скальными породами: рихсчорритами, в нижней части борта – ийолитами, мальвинитами и апатит-нефелиновыми рудами. На отдельных разрезах в верхней части борта в зоне разноса вскрываются ранее сформированные отвалы вскрышных пород. Скальные породы трещиноватые, трещиноватость неравномерная. Наиболее распространены трещины, имеющие крутое падение 60-85° к северу, расстояние между трещинами колеблется от 10-15 см до 1-2 м и более. Структура массива горных пород не влияет на устойчивость северного борта карьера и торцевых его участков в целом, так как в пределах призмы возможного обрушения отсутствуют ослабленные поверхности большой протяженности. Коэффициент крепости руд по шкале проф. Протодяконова составляет 6-9, иногда до 12, вмещающих скальных пород - 9-12, иногда до 16.

Горно-геологические условия отработки месторождения Плато

Расвумчорр открытым способом

Карьер «Центральный». Фактическое положение карьера таково, что борта карьера на значительном протяжении уже сформированы в конечном положении. На западном фланге месторождения по южному борту уступы приведены в конечное положение до отметки + 460 м. В центральной части поставлены на конечный контур до отметки + 550 м. В восточном торце карьера горные работы по постановке уступов на конечный контур достигли отметки + 685 м [69].

Подготовка новых горизонтов осуществляется временными съездами и первоначальными выемками по лежащему боку рудной залежи (южный борт карьера). Развитие горных работ принято двухстороннее от середины к торцам карьера. Высота разрабатываемых уступов составляет 15 м с углом наклона в среднем 75°.

Добыча руды и удаление вскрышных пород производятся с помощью буровзрывных работ. Транспортировка руды из карьера осуществляется через

вертикальные рудоспуски диаметром 6 м, пройденных с горизонта капитальной штольни в карьер. Из камер рудоспусков руда через выпускные устройства загружается в подвижной состав железнодорожного транспорта, которым доставляется к приемным бункерам обогатительной фабрики.

Порода из забоя автотранспортом доставляется в отвал № 11, расположенный на склонах гор Плато Расвумчорр и Восточный Расвумчорр.

Связь карьера с промплощадкой осуществляется по системе съездов, расположенных по южному борту со стороны горы Восточный Расвумчорр. Связь рудника Центральный с городами Кировск и Апатиты, а также с общекомбинатскими объектами осуществляется по автодороге, пройденной по юго-восточному склону горы Ловчорр.

Отвалы. Отвалы запроектированы на основе рекомендаций ГоИ Кольского научного центра РАН «Разработка новой конструктивной схемы безопасного и эффективного отвалообразования на северных склонах Центрального рудника». Транспортирование породы верхних горизонтов при разносе южного борта карьера осуществляется в следующие отвалы: - отвал Южный, расположенный в районе промплощадки Центрального рудника; - отвал Западный в районе склада забалансовой руды; - отвал № 14, расположенный на восточном борту карьера. Транспортирование породы основного карьера осуществляется в следующие отвалы: - внутренний отвал; - отвал № 11 расположенный на северном борту карьера; - отвал № 3Ц, расположенный на северном борту карьера.

В целом, для отвалов, формируемых в условиях района месторождения Плато Расвумчорр, характерна послойная заснеженность - в отвалах присутствуют снежно-ледяные линзы и прослойки. Послойная заснеженность колеблется от 1 % до 58 %, средняя – 8-11%, что вызвано неравномерностью интенсивности отсыпки породы и общего снегонакопления.

Отвал № 11. Данный отвал расположен в северной части Центрального карьера. Практически весь объем вскрыши (90 %) представлен крепкими скальными коренными породами: уртитам, риччорритами, ийолитами,

малиньитами, мельтейгитами, люавритами и ювитами. Кроме коренных пород, в отвалы складировалась переэкскавируемая отвальная масса карьерного поля старых слежавшихся отвалов вскрышных пород, отсыпанных ранее на территории [70].

Отвал № 11 отсыпается на окружающие плато склоны отдельными ярусами высотой до 140м. Высота склонов над дном окружающих долин составляет от 200 до 400 м. Крутизна склонов в верхней части колеблется от 35° до 45°, в средней части - 35-15°, в нижней части - 10-0°, что обуславливается сложностью инженерно-геологических условий его отсыпки. Фактическое состояние отвала показывает, что отвал отсыпался в условиях деформаций. Фактические углы откосов отвала изменяются от 30° до 34°.

Анализ результатов проведенных инженерно-геологических изысканий показал, что несущая способность основания отвала достаточно высока. Высокие фильтрационные свойства пород основания отвала и самой отвальной массы, исключают возможность избыточного обводнения пород в основании отвала, подъема уровня депрессионной поверхности и возникновения слабого контакта в их основании.

2.4 Типизация объектов карьера «Центральный»

Анализ горно-геологических и гидрогеологических условий, выполненный в предыдущем разделе 2.2, позволяет применить критерии типизации, сформулированные в разделе 2.1, и оценить сложность горнотехнических сооружений карьера «Центральный» месторождения Плато Расвумчорр.

В соответствии с указанными значениями высоты бортов, карьер «Центральный» относится к глубоким карьерам, сложенным преимущественно скальными породами. Гидрогеологические условия отработки карьера средней сложности. Обводнение карьера происходит за счет атмосферных осадков, сезонных вод и подземных вод основного водоносного горизонта кристаллических пород. Наиболее распространенным видом деформаций являются осыпи, локальные обрушения и вывалы,

периодически происходит осыпание мелких камней и незначительные сдвиги отдельных стоящих крупных валунов.

Отвал №11 отсыпан из скальных пород, характеризуются высотой порядка 450 м и прочным, но наклонным основанием. К характерным деформационным процессам относятся оползни надподошвенные и подошвенные.

Для территории месторождения характерна средняя сейсмичность, значительная высота, на которой проводятся открытые горные работы, а также воздействие таких климатических факторов, как резкие изменения температуры воздуха, сильный порывистый ветер продолжительные морозы и, как следствие, глубокое промерзание пород и продолжительное залегание снежного покрова.

Анализ сложности объектов открытой разработки месторождения Плато Расвумчорр подробно представлен в таблицах 13-14. Оценивание объектов выполнено с использованием предложенного подхода к анализу сложности. В результате объекты горного предприятия – карьер и отвал №11 - были разделены на 2 типа по сложности – сложные и средние. Карьер определен как сложный объект, отвал – как объект средней сложности (таблица 15).

Таблица 13 - Анализ сложности карьера «Центрального»

Показатель	Значение показателя	
Глубина карьера	Очень большая (более 400 м)	10
Тип месторождения по горным породам	Твердые - скальные (трещиноватые), особого состояния (мерзлые)	7
Степень обводненности	Слабо обводненные и необводненные	1
Деформационные процессы	Вывалы, осадки и провалы на подработанных подземными горными работами территориях	15

Таблица 14 - Анализ сложности отвала №11

Показатель	Значение показателя	
Высота отвала	Высокий (100-200 м)	6
Прочность основания	«Прочное» – прочность основания выше прочности отвальных пород	1

Продолжение таблицы 14

Наклон основания	Наклонное (более 5°)	4
Тип техногенных пород	Насыпные из скальных пород, особого состояния (мерзлые)	2
Гидрогеологические условия	Наличие безнапорного водоносного горизонта	3
Деформационные процессы	Оползни надподошвенные и подошвенные	8

Таблица 15 – Ранжирование объектов открытой разработки месторождения Плато Расвумчорр по степени сложности

Объект	Результирующий показатель сложности	Сложность объекта
Отвал №11	0,5	Объект средней сложности
Карьер «Центральный»	0,7	Сложный объект

2.5 Выводы к главе

Локальные и детальные ПТС, являющиеся объектами наблюдений, требуют использования комплексного подхода к деформационному мониторингу, программа которого должна быть напрямую связана с конструкцией, параметрами и технологией формирования наблюдаемых горнотехнических объектов. Предварительный анализ и типизация объектов, расположенных на ТГП, позволяет подобрать более эффективный вариант организации системы ДМ. Для реализации данного подхода разработана типизация горнотехнических объектов открытой горной разработки, включающая следующие признаки: конструктивные особенности объектов (высота / глубина, прочность и наклон основания), тип горных пород, слагающих массивы, гидрогеологические условия, деформационные процессы, характерные для объектов, характеристики ТГП в целом (сейсмичность территории, особенности рельефа и климата). Оценка выделенных признаков и определение степени сложности каждого объекта выполняется по результатам экспертного анализа. Для апробации разработанной системы для территории открытой разработки месторождения

Плато Расвумчорр выполнен подробный анализ его горно-геологических, гидрогеологических и инженерно-геологических условий. По результатам оценки 2 горнотехнических объектов карьера Центрального выделено 2 типа объектов, различающихся по степени сложности – сложные и средние. К числу сложных отнесен собственно карьер Центральный. Средняя степень сложности характерна для отвала №11.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

3.1 Комплексный деформационный мониторинг территорий открытой разработки месторождений

Основой деформационного мониторинга (ДМ) горного предприятия является обоснование сети наблюдений, создание систематических наблюдений за поверхностью земли, горнотехническими сооружениями, зданиями в пределах горного и земельных отводов. В области технологий наблюдения для современного этапа развития методов деформационного мониторинга характерны следующие тенденции:

1. Автоматизация выполнения наземных маркшейдерско-геодезических наблюдений (переход к автоматизированным и автоматическим средствам съёмки).
2. Активное внедрение новейших методов площадных наблюдений, к числу которых относятся лазерное сканирование, наземная радарная съёмка, дистанционное зондирование Земли из космоса.
3. Совершенствование и активное использование новых технологий аэрофотосъёмки.
4. Комплексное использование методов и средств съёмки земной поверхности.

Таким образом, сегодня становится возможным выполнять комплексный мониторинг земной поверхности в автоматическом и полуавтоматическом режиме одновременно на трёх уровнях: непосредственно на земной поверхности, с воздуха и из космоса. Несмотря на непрерывное совершенствование методов съёмки и их активное применение, научно-методическое обоснование мониторинга деформаций, соответствующее текущему уровню развития технологий, не разработано и остается открытым вопросом. Отсутствуют методики деформационного мониторинга горных предприятий как с использованием отдельно взятых новейших методов наблюдений, так и на основе их комплексного применения.

На сегодняшний день определение состава работ в рамках ДМ горнотехнических сооружений открытой разработки и выбор методов его осуществления производится в соответствии с «Инструкцией по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости» [16], «Методическими указаниями по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости» [17], «Инструкцией по производству маркшейдерских работ» [18]. Основная часть документов разработана в 70-х и 80-х годах прошлого столетия, вследствие чего в них не учтены технические возможности современных геодезических приборов и новейших методов мониторинга.

В данных документах в качестве базового метода мониторинга рассматриваются наземные инструментальные маркшейдерские наблюдения. Как уже было обозначено в главе 1, данный метод обладает рядом недостатков (значительная трудоемкость работ, зависимость от погодных условий, определенный набор наблюдаемых точек), ограничивающих возможности его использования. Отсутствие пространственной информации на территорию наблюдений вследствие невозможности использования классических маркшейдерских съёмок (даже при условии применения электронных автоматизированных систем) может быть компенсирована за счёт использования ГНСС-технологий, методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и др., т.е. за счёт применения комплексного подхода к ДМ. В частности, в ГОСТ Р 55535-2013 допускается комплексирование спутниковых измерений с иными видами геодезических построений при создании информационно-измерительных систем, позволяющих обеспечить квазинепрерывность наблюдений [8].

В связи с этим, требуется разработать новые подходы к ДМ, дополнив методику его проведения возможностями современного этапа развития электронных измерительных систем, ГНСС-технологий, лазерного

сканирования, аэрофотосъёмки, дистанционного зондирования Земли из космоса их использования в комплексе.

Необходимость применения комплексного подхода к ДМ обусловлена тем, что объекты на ТПП, мониторинг которых требуется выполнять, как было обозначено в главах 1 и 2, могут существенно отличаться по характеру деформационных процессов, конструктивным особенностям и другим признакам. Поэтому для эффективной работы системы мониторинга необходимо обосновать комплексное использование различных методов ДМ, базирующееся на свойствах объектов наблюдения.

В «Инструкции по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости» указано, что для предотвращения оползней и обрушений откосов на карьерах и разработки мероприятий, снижающих вредное воздействие деформаций уступов, бортов, отвалов и территорий, прилегающих к карьере, требуется проводить не только систематические инструментальные наблюдения за деформациями откосов, но и изучение физико-механических свойств горных пород, а также геологических и гидрогеологических условий месторождения [16]. Однако конечный выбор метода ДМ осуществляется только в соответствии с типом объекта без учёта его сложности. Таким образом, отсутствует методика, позволяющая на основании анализа горно-геологических, гидрогеологических и инженерно-геологических условий однозначно установить базовый набор методов ДМ, учитывающий сложность наблюдаемого объекта. На практике комплексный подход применяется, но часто выбор технологий обусловлен такими финансовыми возможностями и др. факторами, не относящимися к характеристике самого объекта мониторинга.

В этой связи, одной из основных задач данного исследования является разработка методики деформационного мониторинга открытой разработки, базирующегося на результатах предварительной типизации горнотехнических сооружений, и его апробация на месторождении Плато Расвумчорр.

3.2 Разработка методики комплексного деформационного мониторинга

Ключевой задачей разработки методики комплексного деформационного мониторинга является определение набора методов наблюдения объектов горного предприятия. Решение этой задачи предлагается осуществить на основе разработанной системы критериев типизации горнотехнических объектов на ТПП, сформулированной в главе 2. Выбор методов основан, с одной стороны, на признаках наблюдаемого объекта, в сумме характеризующих степень его сложности, а с другой стороны – на особенностях и технических характеристиках самих методов мониторинга.

Степень сложности горнотехнических объектов проанализирована в главе 2. Для того, чтобы оценить методы мониторинга, предлагается выполнить их классификацию 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.

Выбор данных признаков обусловлен следующими факторами:

1. Деформационные процессы в зоне ведения открытых горных работ подразумевают наличие опасных участков, проведение наблюдений на которых представляет большой риск для жизни маркшейдеров.
2. Деформации земной поверхности чаще всего имеют значительную площадь распространения.
3. Организация мониторинга требует регулярного и оперативного получения данных на территорию, залогом успешной реализации которого является использование преимущественно автоматизированных и автоматических систем наблюдений.

Безусловно, одним из важнейших факторов, влияющих на выбор методов мониторинга, является стоимость организации мониторинга, т.к. конечное решение о составе комплекса технических средств для производства

наблюдений, как правило, зависит от финансовых возможностей горного предприятия. Оценка стоимости проведения работ напрямую зависит от характеристик территории наблюдения (площади, характера подстилающей поверхности) и в данной классификации не рассматривается. Не менее важным фактором является точность наблюдений, определяющая область применения конкретного метода мониторинга, которая может варьироваться от обзорной мелко- и среднемасштабной съёмки территории до детальных крупномасштабных измерений отдельно взятых объектов. Современные методы деформационного мониторинга характеризуются как высокоточные, но итоговая оценка точности напрямую зависит от свойств объекта, условий съёмки и других факторов, которые необходимо учитывать индивидуально в каждом конкретном случае выполнения наблюдений.

В качестве методов деформационного мониторинга рассматриваются: наземные инструментальные маркшейдерские наблюдения, ГНСС-технологии, наземное лазерное сканирование, аэрофотосъёмка, съёмка наземным радаром, космическое радиолокационное зондирование. Детальное описание перечисленных методов и их сравнительный анализ выполнены в главе 1. В дополнение к обозначенным методам также предлагается использовать визуальные наблюдения и дистанционное зондирование Земли из космоса в оптическом диапазоне – особенности их применения более подробно рассмотрены в разделах 3.4 и 3.5.

Для того, чтобы определить место каждого метода в системе мониторинга, на первом этапе был выполнен их анализ по 3-м обозначенным выше принципам: технологии наблюдений, пространственному охвату съёмки, степени автоматизации метода. Результаты классификации представлены в таблице 16.

Таблица 16 - Классификация методов деформационного мониторинга по способу, пространственному охвату и степени автоматизации наблюдений.

Методы деформационного мониторинга и их характеристики		Наземная маршейдерская съёмка	ГНСС-мониторинг	Лазерное сканирование	Наземная радарная съёмка	Аэрофотосъёмка	Космическая радарная съёмка	Оптическое ДЗЗ из космоса
Способ измерений	Контактные	+	+					
	Дистанционные			+	+	+	+	+
Пространственный охват наблюдений	Точечные	+	+					
	Площадные			+	+	+	+	+
Степень автоматизации наблюдений	Неавтоматизированные	+						
	Автоматизированные		+	+		+		
	Автоматические		+	+	+		+	+

Чем выше степень сложности объектов, тем более важными являются следующие требования к мониторингу деформаций: - высокая степень автоматизации методов минимальное присутствие человека на опасных участках, связанные с риском возникновения опасных разрушающих деформаций и их последствий; - применение преимущественно площадных методов, также связанное с рисками, сопутствующими деформациям, и необходимостью получения наиболее полной картины процессов на территории. В этой связи базовый принцип определения методики наблюдений заключается в следующем: по мере повышения уровня сложности ТПП расширяется комплекс проводимых наблюдений, степень их автоматизации и пространственный охват съёмки.

Таким образом, мониторингу сложных и особо сложных объектов соответствует максимальная автоматизация и площадь съёмки, а в целом – использование наиболее полного комплекса методов. Для объектов средней степени сложности возможно выполнение съёмки с определенных пунктов съёмочной сети с использованием неавтоматизированных инструментальных средств наблюдений. Требования к мониторингу простых объектов минимальны, их контроль может базироваться только на результатах

визуальных наблюдений. Для учёта каждого из перечисленных требований выделены характеристики методов ДМ и определен комплекса методов ДМ в зависимости от сложности наблюдаемого горнотехнического объекта (таблицы 17-18).

Таблица 17 - Выбор методов деформационного мониторинга с учётом их характеристик

Сложность объектов	Характеристики методов деформационного мониторинга
Простой объект	Визуальные
Объект средней сложности	Визуальные / Наземные контактные / Точечные / Неавтоматизированные
Сложный объект	Дистанционные / Площадные / Автоматизированные
Особо сложный объект	Дистанционные / Площадные / Автоматические

Таблица 18 - Выбор методов деформационного мониторинга в зависимости от технологии съёмки

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			+	+

На основании разработанного подхода к определению состава методов ДМ сформулированы следующие рекомендации по осуществлению наблюдений на объектах различных категорий сложности:

1. Простые объекты контролируются с использованием визуальных методов. При выполнении мониторинга деформаций на простых объектах достаточно применять только визуальные методы наблюдений. В особых случаях, обоснованных проектами, можно применять инструментальные наблюдения.

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

3. Мониторинг сложных объектов выполняется с использованием: - наземных контактных автоматизированных методов; - дистанционных площадных методов, таких как космическая радарная съёмка / аэрофотосъёмка. В качестве базового метода постоянного площадного контроля деформаций рекомендуется использовать именно 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 способов бесконтактных автоматических площадных наблюдений. В качестве базового метода постоянного площадного контроля используется радиолокационное ДЗЗ. Мониторинг качественных показателей земной поверхности и контроль объектов инфраструктуры базируется также на данных оптического ДЗЗ высокого пространственного разрешения.

3.3 Требования к производству деформационного мониторинга

На всех этапах освоения МПИ открытым способом выполняются маркшейдерские работы, состав которых зависит от этапа разработки и определяется соответствующим «Положением о геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр» (РД 07-408-01), утвержденном Ростехнадзором РФ 22.05.2001. В процессе эксплуатации МПИ одной из задач маркшейдерской службы являются «ведение мониторинга состояния недр, включая процессы сдвижения горных пород и земной поверхности, геомеханических и геодинамических процессов при недропользовании в целях предотвращения вредного влияния горных разработок на горные выработки, объекты поверхности и окружающую природную среду». «Инструкцией по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по

обеспечению их устойчивости» обоснована необходимость выполнения наблюдений за устойчивостью бортов карьеров, уступов и отвалов, дамб хвостохранилищ. При выявлении процессов деформирования маркшейдерский контроль принимает форму мониторинга.

Производству деформационного мониторинга предшествует несколько этапов:

1. Анализ горно-геологических, инженерно-геологических и гидрогеологических условий.
2. Типизация горнотехнических объектов по степени их сложности.
3. Определение количественных и качественных параметров, наблюдение которых необходимо в ходе выполнения мониторинга.
4. Обоснование методов и средств мониторинга деформаций на основе результатов предварительной типизации объектов.
5. Установление регламента производства наблюдений на основе результатов исследований территории.

После этого начинается выполнение систематических наблюдений, в состав которых входят: - регулярные наблюдения качественных параметров; - регулярные инструментальные измерения количественных параметров деформаций земной поверхности.

Наблюдения качественных параметров выполняются преимущественно по результатам визуальных наблюдений. Систематические визуальные наблюдения включают: - контроль состояния откосов в карьере и на отвалах - выявление заколов, трещин и их характеристик; - определение границ зон обрушения – для подрабатываемых территорий; - установление характера и степени повреждений зданий и сооружений, находящихся в зоне влияния горных работ; - фиксирование подъемов / просадок и сдвигов объектов транспортной сети и ЛЭП, находящихся в зоне влияния горных работ.

Визуальные наблюдения основываются на использовании простейших измерительных инструментов – линейки, рулетки, компаса. Результаты наблюдений фиксируются в полевом журнале с указанием даты и объекта

наблюдений, характера и размеров деформаций, места проведения наблюдений. Вместе с глазомерными наблюдениями выполняются зарисовки / фотоснимки контролируемых объектов и процессов [71]. Визуальные наблюдения, в случае мониторинга объектов средней сложности и выше, сопровождают и дополняют инструментальные наблюдения: это даёт возможность не только зафиксировать видимые качественные признаки процессов деформирования, но и дать им численную количественную оценку.

Периодичность визуальных наблюдений, равно как и инструментальных зависит от вида и характеристик наблюдаемого деформационного процесса. Согласно «Методическим указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов» периодичность инструментальных наблюдений устанавливается исходя из скорости деформирования (таблица 19) [17].

Таблица 19 - Требования к периодичности наблюдений в зависимости от скорости смещений прибортового массива [17]

Скорость смещения, мм/сутки	0,1	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0
Периодичность наблюдений, сутки	730	150	75	40	15	8	4
Продолжительность одной серии наблюдений, час	720	144	72	36	15	7	4

Для маркшейдерского контроля деформаций, в зависимости от продолжительности и объема проводимых измерений, выделяют 3 типа наблюдений [7]:

1. Фундаментальные наблюдения начинают одновременно с началом отработки месторождения и выполняют для определения основных параметров процессов деформирования и их детальной характеристики при изменении условий устойчивости. Фундаментальные наблюдения выполняются на основе заложенной системы опорных пунктов и реперов с частотой от 1-2 раз в год до 1 раза в 2-3 года в скрытую и начальную стадии развития деформаций.

2. Временные инструментальные наблюдения направлены на установление закономерностей процессов деформирования на отдельных участках горного отвода, характеризующихся недостаточной устойчивостью или расположенных в непосредственной близости от охраняемых сооружений, и выполняются с периодичностью, зависящей от интенсивности развития деформаций.

3. Упрощенные наблюдения проводятся в отдельных точках подверженных деформированию участков с целью измерения деформаций в период их активной стадии (например, раскрытие трещин, деформации сооружений). Высокая интенсивность развития процессов требуют максимальной частоты наблюдений, в связи с этим используются автоматические дистанционные методы, а также простейшие способы, в том числе визуальные.

В общем случае, как правило, требуется максимально возможная периодичность измерений. Для скальных пород это объясняется характером их деформирования – максимальное напряжение приводит к стремительному разрушению горной породы, своевременное фиксирование максимально допустимой деформации возможно только при высокой частоте наблюдений.

Основные параметры маркшейдерской деформационной сети зависят от множества факторов и определяется индивидуально в каждом конкретном случае следующим образом:

– выбор типа, конструкции, размеров и плотности реперов наблюдательной станции выполняется исходя из горно-геологических условий территории наблюдения;

– количество пунктов сети устанавливается в зависимости от площади территории наблюдений;

– границы исследуемой территории устанавливаются в соответствии площадью распространения процессов деформирования и тектонических нарушений, площадью открытой разработки месторождения в целом, расположением горнотехнических объектов;

– плотность пунктов наблюдательной сети определяется размерами и параметрами горнотехнических объектов и охраняемых сооружений, попадающих в зону влияния горных работ, особенностями тектонического строения месторождения и др. [21].

При определении требований к точности исходят из решаемых задач и реальной возможности определения смещений имеющимися методами и средствами измерений. В частности, для контроля прибортового массива горных пород на предмет возможности образования оползней согласно «Методическим указаниям по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости» требования следующие [7]:

- погрешность определения смещений m_{AS} не должна превышать $\pm 10-15$ мм;
- погрешность определения пунктов и реперов в одной серии наблюдений $m_s = \pm 10$ мм;
- погрешность относительного смещения реперов на 20-метровом интервале $\pm 5-7$ мм.

Контроль возможности образования обрушения, а также раннее обнаружение потенциального оползнеобразования требует более точных наблюдений.

Плановая съемка наземных рабочих реперов наблюдательных линий выполняется с опорных реперов, положение которых контролируется один раз в год с исходных точек маркшейдерской опорной сети. Высотные отметки наземных рабочих и опорных реперов определяются геометрическим нивелированием III класса. Плановое и высотное положение видимых карьерных рабочих реперов одновременно определяется тригонометрическим нивелированием.

По результатам наблюдений определяются следующие параметры, характеризующие процесс деформирования: - горизонтальные смещения реперов (мм); - вертикальные смещения реперов (мм); - полный вектор смещений (мм) и угол его наклона ($^\circ$); - горизонтальные деформации -

интервал между реперами за период между двумя сериями наблюдений; скорость полного вектора смещения за период наблюдений (мм/сутки).

Деформационная сеть, построенная для производства наземных маркшейдерских инструментальных наблюдений, может быть применена при проведении измерений с использованием других методов. В частности, при использовании ГНСС-технологий в качестве опорных реперов применяются пункты государственной геодезической сети (ГГС) и опорных маркшейдерско-геодезических сетей на территории на горного предприятия. Увеличение плотности сети возможно на основе использования реперов профильных линий [21]. Проведение аэрофотосъёмки также требует наличия сети опорных и контрольных пунктов. Производство съёмки лазерными сканерами включает этапы создания съёмочного обоснования (основного планово-высотного обоснования) и системы ориентирных марок (рабочего планово-высотного обоснования).

По мере увеличения степени сложности объектов наблюдения, на смену наземным инструментальным маркшейдерским наблюдениям приходят ГНСС-технологии, наземное лазерное сканирование, аэрофотосъёмка, наземная и космическая радарная съёмка. Как уже было обозначено в разделе 3.1, в настоящее время на организацию работ по комплексному использованию ГНСС-технологий и площадных методов, таких как лазерное сканирование и наземная радарная съёмка, в целях деформационного мониторинга отсутствует нормативная база. В связи с этим, методики их применения не рассматриваются в рамках данного исследования. Нормативно-правовые документы, регламентирующие применение космического радиолокационного зондирования, также на данный момент не разработаны. Рекомендуемая методика выполнения комплексного мониторинга деформаций с использованием космической радарной съёмки представлена в разделе 3.4 и главе 4.

Для оценки качественных параметров сложных и особо сложных объектов рекомендуется применять дистанционное зондирования Земли из космоса в оптическом диапазоне. Съёмка в видимом диапазоне, как пассивный метод дистанционного зондирования, регистрирует солнечное излучение, отраженное объектами в соответствии с их спектральной отражательной способностью. В результате на снимках отображаются оптические характеристики объектов - их спектральная яркость. Для съёмки необходима освещенная поверхность, облачность в данном случае ограничивает возможности зондирования. Одним из ключевых свойств снимков является пространственное разрешение, характеризующее размер пикселя изображения [7]. Для решения задач мониторинга горного предприятия требуется использование данных высокого, очень высокого и сверхвысокого пространственного разрешения (таблица 20) [72]. Эти данные могут быть получены как с зарубежных спутников (Pleiades-1, RapidEye, SPOT-6/7, Sentinel-2 и др.), так и с отечественных КА (Ресурс-П, Канопус-В).

Таблица 20 - Классификация снимков по пространственному разрешению

Снимки низкого разрешения	$R = n1000$ м
Снимки среднего разрешения	$R = n100$ м
Снимки высокого разрешения	$R = n10$ м 0-100 м - относительно высокого 10-30 м - высокого
Снимки очень высокого разрешения	$R = n1$ м
Снимки сверхвысокого разрешения	$R = <1$ м

3.4 Космическое радиолокационное зондирование в системе деформационного мониторинга

Космическое радиолокационное зондирование занимает особое место в системе комплексного мониторинга деформация земной поверхности.

Радарная съёмка из космоса предоставляет данные о качественных и количественных характеристиках земной поверхности. Применительно к мониторингу горных предприятий радарное ДЗЗ позволяет осуществлять:

1. Высокоточный контроль смещений земной поверхности на базе метода радарной интерферометрии.

2. Построение цифровых моделей рельефа на базе метода радарной интерферометрии.

3. Получение информации о геометрии горнотехнических объектов.

Космическая радарная интерферометрия – метод космической геодезии, основанный на данных спутниковых РСА и использующий эффект интерференции электромагнитных волн для измерения рельефа и деформаций земной поверхности [73]. Интерферометрическая съёмка – получение двух и более радиолокационных изображений территории с соблюдением определенных условий - интерферометрической базы. Интерферометрическая база может быть пространственной и временной:

– пространственная база – расстояние между положениями РСА на орбите при интерферометрической съёмке. На практике применяется перпендикулярная составляющая базовой линии - расстояние между двумя РСА, измеренное перпендикулярно линии зондирования [97].

– временная (темпоральная) база - временной промежуток между циклами интерферометрической съёмки.

Пригодность интерферометрических пар радарных снимков к обработке определяется когерентностью. Применительно к данным РСА под когерентностью принято понимать степень сходства двух радиолокационных изображений [97]. Нарушение пространственного и/или временного базиса приводит к потере когерентности - декорреляции. При превышении критического значения пространственной базы возникает пространственная декорреляция. Критическое значение перпендикулярной базы для пары снимков вычисляется по формуле :

$$B_{n,cr} = \frac{\lambda R \operatorname{tg} \theta}{2R_r} \quad (3)$$

где λ - длина волны РСА, R – наклонная дальность, θ – угол между дальностью и высотой РСА, R_r - пространственное разрешение по наклонной дальности [31].

Суточная или сезонная изменчивость характеристик подстилающей поверхности в период между циклами съёмки может стать причиной временной декорреляции. Решением данной проблемы может послужить увеличение длины волны зондирующего сигнала, уменьшение временного интервала. В целом, чем меньше пространственная и временная база, тем выше корреляция данных и чувствительность к изменениям поверхности. При этом, величина временного интервала должна быть достаточной для фиксирования смещений в случае выполнения их мониторинга.

Построение ЦМР выполняется по результатам интерферометрической обработки двух снимков, полученных на близкие даты, но с разных (с соблюдением требований к перпендикулярному базису). Данный метод носит название InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). Для определения смещений применяется дифференциальная интерферометрия – DInSAR (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar). Смещения поверхности рассчитываются через разность фаз двух снимков, полученных с близких орбит, но на разные даты. В процессе обработки вычитается фаза рельефа поверхности.

В общем случае использование радарной съёмки в системе комплексного деформационного мониторинга включает следующие этапы:

1. Съёмка территории с помощью РСА с заданной периодичностью, зависящей от характеристик используемого КА.
2. Получение радарных снимков на территорию.
3. Интерферометрическая обработка пары / серии снимков.
4. Расчёт деформаций земной поверхности.
5. Построение карт деформаций земной поверхности.

Результаты расчёта деформаций земной поверхности могут быть уточнены с помощью данных наземной съёмки по опорным / контрольным

пунктам. Для повышения точности метода радарной интерферометрии могут быть использованы наземные уголковые отражатели, являющиеся устойчивыми постоянными рассеивателями сигнала и устанавливаемые на заданных участках территории наблюдений. Подробные требования к характеристикам исходных данных, а также методика применения радарной съёмки для заполярных территорий представлены в разделе 4.2.

Помимо мониторинга состояния земной поверхности, необходимо выполнять мониторинг объектов инфраструктуры и транспортной сети, а также границ горного отвода в целом [74-76, 98, 99]. Эта задача также решается за счёт использования радарных данных, но в отличие от мониторинга смещений, для определения которых используется фазовая составляющая снимков, в данном случае основное внимание уделяется анализу амплитудного слоя. Результаты используются для измерения площади и контроля границ горного отвода, объектов инфраструктуры и транспортной сети, а также для расчёта объёма вынутых пород по вскрыше и добыче при анализе динамики выполнения открытых горных работ.

Таким образом, радарные снимки могут быть использованы как полноценная пространственная основа для выполнения анализа и контроля объектов на территории горного предприятия, а также в качестве материала для уточнения и построения топографических карт, масштаб которых зависит от пространственного разрешения исходных радарных данных. С точки зрения функции, которую может выполнять радарная съёмка в системе мониторинга деформаций, рассматриваются 2 варианта:

1. Самостоятельный метод мониторинга: использование метода радарной интерферометрии позволяет добиться высокой точности наблюдений в широкой полосе обзора, конкурируя с другими площадными методами (аэрофотосъёмкой и лазерным сканированием).

2. Дополнение к системе высокоточных площадных и точечных наблюдений: радарная съёмка, при соблюдении требуемых технологий обработки, не нуждается в проведении систематических подспутниковых

наблюдений и, таким образом, может быть использована в качестве базового метода регулярного оперативного мониторинга, позволяя выявить начало развития деформационных процессов и выделить те участки, на которых требуется проведение более детальных локальных наблюдений.

Космическое радиолокационное зондирование также является перспективным базовым методом регулярного деформационного мониторинга в силу основных тенденций развития и использования данной технологии, к которым относятся: - разработка новых радарных спутников; - разработка новых методов обработки серий снимков; - совместный анализ данных разных диапазонов; - появление открытых данных; - разработка открытого программного обеспечения; - обработка радарных данных на базе веб-сервисов; - совместный анализ данных радарного зондирования, съёмки в видимом диапазоне, наземных инструментальных съёмок.

3.5 Мониторинг деформаций земной поверхности на территории карьера «Центральный»

На сегодняшний день наблюдения за устойчивостью бортов карьера осуществляется по результатам тахеометрической съёмки и визуальных наблюдений. Съёмку проводят не чаще чем 1 раз в квартал главным образом на 2-х участках: северо-западном борту в зоне стыковки открытых и подземных работ и на южном борту. В западной части карьера необходимость проведения наблюдений за деформированием прибортового массива обусловлена расположением в основании борта действующих рудоспусков, зумпфа, а также подземных горных выработок и планами отработки стыковочной зоны. В распоряжении геолого-маркшейдерской службы Центрального рудника имеется следующее оборудование: тахеометр GPT-3005N, тахеометр электронный Leica TS11R400 5", тахеометр электронный Leica TCR-307, тахеометр электронный Leica GPT-3005LN. Результаты съёмок и наблюдений фиксируются в следующих журналах осмотра состояния откоса и деформаций отвалов. Визуальный контроль осуществляется раз в месяц. Проведение более детальных наблюдений затруднено в виду высокой текущей

загруженностью и малого количества персонала. Наблюдения за устойчивостью отвала №11 проводят с применением инструментальных наблюдений по двум профильным линиям с использованием ГНСС-систем (рисунок 10).

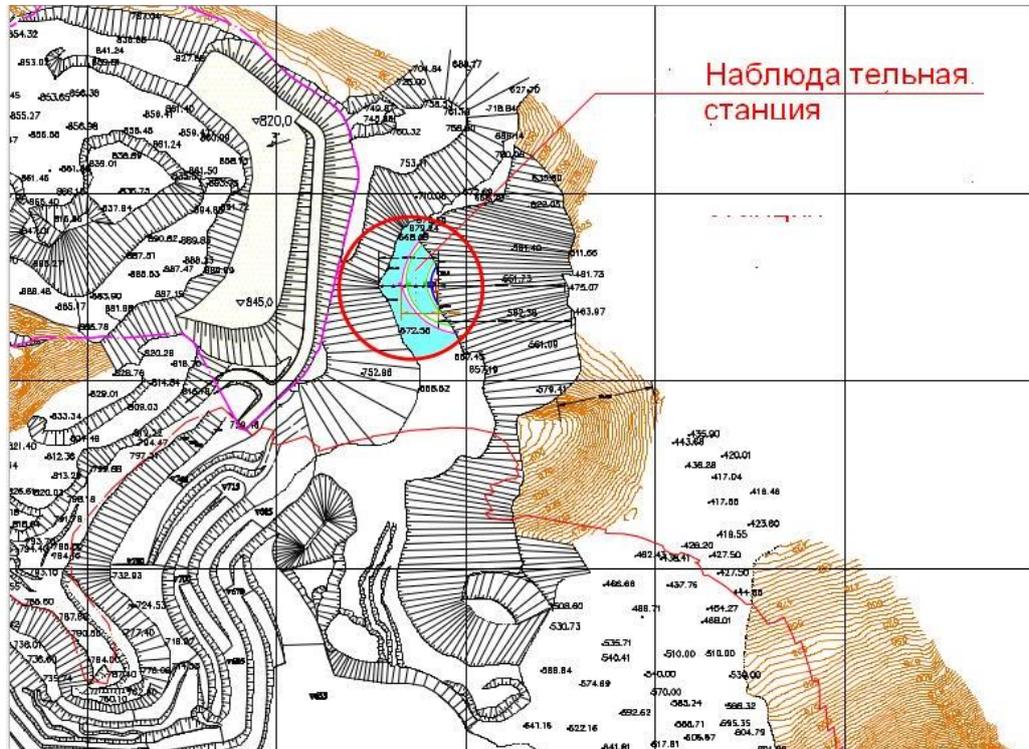


Рисунок 10 - Наблюдательная станция на территории карьера «Центрального»

На основании типизации объектов карьера «Центрального» для мониторинга данной территории рекомендуется использовать следующие методы:

1. Так как карьер характеризуется как сложный объект, то необходимо контролировать горнотехнические объекты и поверхность земли с помощью площадных автоматизированных бесконтактных методов для определения величин, скорости, направления деформаций, при этом определение качественных показателей следует выполнять с помощью визуальных и дистанционных методов.

2. Отвалы, сложность которых характеризуется как средняя, необходимо наблюдать с использованием наземных инструментальных

маркшейдерских съёмок - для определения количественных показателей, и визуальных методов - для определения качественных показателей.

Проведение наземных измерений на территории карьера сильно затруднено в связи небольшим количеством светлых и безоблачных дней, а также продолжительным периодом залегания снежного покрова. Пространственный охват выполняемых измерений ограничен ввиду большого числа опасных участков. По этим причинам на значительную часть горного отвода отсутствуют актуальные пространственные данные.

В этой связи, в качестве метода деформационного мониторинга предлагается использовать космическое радиолокационное зондирование. Вместе с тем использование радарной съёмки ставит ряд новых вопросов:

1. Адаптация существующих методик обработки и использования радарных данных с учетом условий Заполярья. С одной стороны, длительный снежный покров и короткое лето сокращают сроки измерений и, соответственно, повышают требования к точности измерений. Также необходимо получение оценок для зимнего периода, частично с помощью проведения дополнительных измерений при малом и неплотном снежном покрове, частично – с помощью интерполяции и экстраполяции с учетом данных для точечных наблюдений по реперам. С другой стороны, редкая растительность и каменистый покров повышают отражающие свойства земной поверхности, что облегчает достижение требуемого увеличения точности измерений.

2. Отработка методики наблюдений, позволяющей выделить участки горного отвода, наиболее подверженные именно горизонтальным деформациям, т.к. при радарной съёмке точность оценки оседаний выше, чем точность оценки горизонтальных смещений, более важных для выявления опасных деформаций.

3. Обоснование требований и подбор исходных данных (радарных снимков и дополнительных материалов, таких как цифровая модель рельефа и

др.) в соответствии со спецификой наблюдаемой территории и задачами деформационного мониторинга.

3.6 Выводы к главе

Обеспечение безопасности функционирования горных предприятий достигается путем выполнения деформационного мониторинга, включающего систематические наблюдения количественных и качественных показателей деформаций земной поверхности и сооружений. В рамках разработанной методики комплексного деформационного мониторинга при выборе методов для системы мониторинга учитываются следующие факторы: - степень сложности наблюдаемых горнотехнических объектов, выявленная по результатам типизации объектов горного предприятия; - особенности и технические характеристики методов мониторинга.

По результатам совместного анализа этих факторов выполнена классификация методов наблюдения деформаций в зависимости от степени сложности объектов горного предприятия. Для каждой категории горнотехнических объектов обоснован комплекс методов мониторинга. Комплекс проводимых наблюдений расширяется с увеличением сложности наблюдаемой ПТС.

Для мониторинга деформаций на простых объектах достаточно применения визуальных методов. При наблюдении объектов средней сложности глазомерная съёмка дополняется наземными инструментальными маркшейдерскими методами. Мониторинг сложных объектов базируется на применении площадных контактных и дистанционных методов. Особо сложные объекты требуют использования автоматизированных и автоматических систем дистанционного площадного мониторинга. При этом космическое радиолокационное зондирование применяется на сложных и особо сложных объектах в качестве базового метода площадного контроля: уровень сложности ПТС определяет требования к характеристикам исходных данных и технологиям их обработки.

На основе разработанной методики сформулированы рекомендации по проведению мониторинга на объектах открытой горной разработки карьера «Центрального». В качестве метода ДМ предлагается использовать космическое радиолокационное зондирование. Решение этой задачи требует разработки и апробации методики применения радарной съёмки с учётом специфики ТГП и условий Заполярья.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРИМЕНЕНИЯ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

4.1 Общие положения

Анализ особенностей инженерно-геологических, горно-геологических и физико-географических условий открытой разработки месторождения Плато Расвумчорр показал необходимость использования комплексного мониторинга данной ТПП. Карьер «Центральный», как сложный объект, требует выполнения мониторинга на основе площадных автоматизированных бесконтактных методов. В качестве базового метода ДМ предлагается использовать космическое радиолокационное зондирование. Актуальность применения космической радиолокации также подтверждается сложными климатическими условиями, не только способствующими процессам деформирования (морозное выветривание), но и существенно ограничивающими возможности выполнения мониторинга на исследуемой ТПП (раздел 2.2).

Определение деформаций земной поверхности на территории карьера «Центрального» по данным космического радиолокационного зондирования требовало решения следующих задач:

- определение характеристик исходных радарных данных, обоснование требований к ним;
- анализ существующих радарных КА и предоставляемых ими данных;
- подбор исходных данных (КА) в соответствии с установленными требованиями и свойствами наблюдаемых объектов;
- анализ существующих методик обработки радарных снимков;
- анализ существующего программного обеспечения для выполнения интерферометрической обработки радарных снимков;
- радарная съёмка территории исследования и получение её результатов;
- апробация существующих методик для данных на территорию исследования;

– адаптация существующих методик обработки и разработка методики использования данных космической радарной съёмки с учетом условий Заполярья;

– апробация разработанной методики и расчёт деформаций земной поверхности на территории горного предприятия.

Радиолокационный мониторинг территории исследования, в соответствии с разделом 3.4, включал следующие основные этапы:

1. Съёмка территории с помощью РСА в соответствии с установленным графиком.
2. Получение радарных снимков на территорию исследования.
3. Интерферометрическая обработка радарных снимков.
4. Определение деформаций земной поверхности.
5. Построение карт деформаций земной поверхности.

Определение смещений выполняется с использованием метода радарной интерферометрии по результатам интерферометрической обработки радарных снимков. Мониторинг объектов горного отвода включает обработку амплитудной составляющей радиолокационных изображений. Построение карт и визуализация результатов осуществляется с использованием геоинформационных технологий.

4.2 Разработка рекомендаций по подбору данных радиолокационного зондирования

Для того, чтобы подобрать подходящие для выполнения деформационного мониторинга данные, необходимо проанализировать основные свойства радарных снимков и сформулировать требования к исходным данным.

Радарный снимок является комплексным изображением, содержащим амплитудный и фазовый слои. Каждый пиксель радиолокационного изображения содержит значение амплитуды и фазы сигнала. Амплитуда или интенсивность (квадрат амплитуды) сигнала на РЛИ отображается в виде градаций фототона [77].

Данные радарной съёмки характеризуются: - диапазоном волн, в котором была выполнена съёмка; - поляризацией сигнала, при которой получен снимок; - пространственным разрешением РЛИ; - режимом съёмки и шириной полосы обзора, при которых были получены данные; - углом падения сигнала при съёмке поверхности; - уровнем обработки данных.

Диапазон волн. От длины волны зависит способность радиоизлучения проникать в вещество: чем больше длина волны, тем выше её проникающая способность. Так, излучение в L-диапазоне обладает значительно большей проникающей способностью по сравнению с излучением в X-диапазоне. Проникающая способность радиоизлучения также зависит от угла визирования, свойств зондируемой поверхности, но для приближенной оценки проникающая способность приравнивается к половине длины волны [77].

Поляризация волн. Электромагнитные волны, используемые при радиолокационном зондировании, обладают векторным свойством – поляризацией. Поляризация излучения определяется ориентацией вектора электрического поля в плоскости, перпендикулярной направлению распространения радиоволны. Как правило, используется линейная поляризация - горизонтальная или вертикальная. Горизонтальная поляризация означает, что вектор электрического поля параллелен подстилающей поверхности, а вертикальная - что вектор направлен под углом падения к местной вертикали [28]. Поляризация является важным свойством, поскольку коэффициент отражения волны зависит от ориентации поляризационной плоскости относительно отражающей поверхности. При использовании горизонтальной поляризации горизонтальные линейные объекты, параллельные вектору электрического поля, дают интенсивное отражение, а вертикальные объекты – слабое. В режиме вертикальной поляризации интенсивное отражение дают вертикальные объекты, а также горизонтальные, если они направлены от радиолокатора. Различают также параллельную (согласованную) поляризацию (HH – горизонтальная, VV - вертикальная) и

ортогональную или кроссполяризацию (HV, VH). Использование различных поляриметрических каналов повышает информативность РЛИ.

Пространственное разрешение. Радиолокационное зондирование использует режим бокового обзора, поэтому полоса обзора радиолокатора сдвинута относительно траектории полёта (различают радиолокаторы правостороннего и левостороннего обзора). Съёмка может выполняться в кадровом или маршрутном режимах. Система координат радарного снимка – «наклонная дальность – путевая дальность (азимут)».

Пространственное разрешение РЛИ по наклонной дальности (ρ_R) определяется шириной спектра излучения [28]:

$$\rho_R = \frac{c}{2\Delta F} \quad (4)$$

где ΔF – ширина спектра зондирующего сигнала, c – скорость света.

Разрешение по горизонтальной дальности на местности (ρ_Y) определяется через разрешение по наклонной дальности и угол падения [28]:

$$\rho_Y = \frac{\rho_R}{\sin \gamma_i} \quad (5)$$

где γ_i – угол падения зондирующего сигнала.

Угол падения радиолуча отсчитывается от местной вертикали. Значение угла падения в пределах полосы обзора возрастает по направлению от радиолокатора.

Пространственное разрешение по азимуту варьируется в зависимости от типа радиолокатора. В РСА оно определяется длиной синтезированной апертуры, зависящей от длины участка зондирования [28]:

$$\rho_X = 0,44 \frac{R_\lambda}{L_a} \approx \frac{R_\lambda}{2L_a} \quad (6)$$

где L_a – длина синтезированной апертуры.

Полоса обзора. Размер полосы обзора радиолокатора определяется наклонной (или горизонтальной) дальностью и азимутальной дальностью. Ширина полосы захвата и размер снимаемого радиолокатором кадра варьируются в зависимости от режима съёмки РСА. Основными режимами съёмки РСА являются:

– маршрутный режим – съёмка ведется непрерывно в течение длительного времени в пределах возможной полосы обзора.

– прожекторный режим - при съёмке луч антенны направляют в центр кадра, вращая его по азимуту; метод способствует улучшению пространственного разрешения по азимуту.

– широкозахватный режим (ScanSAR) – съёмка ведется кадрами с использованием нескольких лучей; метод способствует ухудшению пространственного разрешения.

Данные режимы в тех или иных модификациях (периодичность, пространственное разрешение) присутствуют во всех радарных спутниковых системах.

Угол падения. Угол падения влияет на величину отраженного сигнала. Эта зависимость меняется для разных типов зондируемой поверхности: для гладких поверхностей (например, асфальт, бетон) мощность отраженного сигнала возрастает с уменьшением угла падения, для сильно шероховатых поверхностей (например лесная растительность) - практически не зависит от угла падения. На угол падения (или угол скольжения) в свою очередь оказывают влияние 2 фактора: направление зондирования и местный наклон рельефа. Таким образом, поверхность, обращенная к антенне, отражает большую часть сигнала в направлении антенны и на снимке передается светлыми оттенками фототона. Поверхность, наклонённая от антенны, отражает меньший сигнал и передается более темными оттенками фототона.

В связи с тем, что наклонная дальность рассчитывается из длительности импульса, радиолокационная съёмка не ведётся в при углах падения менее 15-20° и в надир – в этом случае сигналы, отраженные от множества расположенных близко объектов, практически одновременно достигают локатора.

Радиометрическое разрешение. Радиометрическое разрешение определяет способность РСА различать объекты с разной отражающей способностью и характеризует минимальную величину различения

эффективной площади рассеяния (ЭПР) двух целей: чем выше радиометрическое разрешение, тем меньшую разницу между двумя значениями ЭПР целей можно определить [28].

Уровень обработки данных. Характеристики радарного снимка зависят от уровня его обработки, в соответствии с которым РЛИ могут быть представлены в различных системах координат (таблица 21).

Таблица 21 – Основные уровни обработки радарных данных и характеристики получаемых продуктов

Уровень обработки	Тип данных	Система координат, проекция
L0	Первичные несфокусированные данные (raw data)	Наклонная дальность – азимут
L1	Геоереференцированные данные	Наклонная дальность – азимут, с привязкой к географическим координатам Горизонтальная дальность - азимут
	Геокодированные данные	Географические координаты, картографическая проекция (как правило, проекция Меркатора или полярная стереографическая проекция)
	Ортотрансформированные данные	Географические / прямоугольные координаты Картографическая проекция с устранением геометрических погрешностей, вызванных рельефом поверхности
L2	Производные тематические продукты	Географические / прямоугольные координаты Картографическая проекция с устранением геометрических погрешностей, вызванных рельефом поверхности

Искажения на радиолокационных изображениях. Геометрия радиолокационной обзора определяет ряд особенностей и искажений РЛИ:

1. Спекл-шум – флуктуации радиолокационного сигнала, вызванные интерференцией волн, отраженных от множества зондируемых объектов и их элементов в пределах элемента разрешения. Спекл-шум обуславливает зернистость изображения.

2. Радиолокационная тень – участок поверхности, наклоненный от локатора под углом большим угла падения и, как следствие, не облученного

радиосигналом и передаваемого на снимке абсолютно чёрным тоном. Радиолокационная тень может быть использована для определения высоты отдельных объектов, например, деревьев, сооружений.

3. Перспективное сжатие (Foreshortening) при съёмки местности с выраженным рельефом.

4. Переналожение (Layover) – возникает, когда радарный сигнал достигает вершины объекта раньше его основания. В результате сигнал, отраженный от вершины, будет получен раньше сигнала, отраженного от основания, вершина будет смещена относительно её истинного положения в направлении радара и перекроет основание.

Современные радиолокаторы с синтезированной апертурой. В настоящее время на орбите функционирует обширная группировка радарных спутников. РСА различаются по используемому диапазону радиоволн, ширине полосы обзора, периодичности съёмки, набору режимов съёмки, пространственному разрешению и др. Краткие сведения о современных спутниковых радиолокаторах приведены в таблице 22. Кроме того, существует большой объём архивных радарных данных со спутников первого поколения, прекративших своё функционирование: ERS, JERS, ENVISAT, RADARSAT-1 и др. Архивные радарные данные представляют большой научный интерес, т.к. на их основе выполняется анализ динамики деформаций земной поверхности и временной изменчивости состояния горного массива.

Таблица 22 - Основные характеристики съёмочных систем современных радарных спутников

	RADAR SAT-2	COSMO-SkyMed	TerraSAR-X	ALOS-2	Sentinel-1	RISAT-1
Страна	Канада	Италия	Германия	Япония	ЕС	Индия
Год вывода на орбиту	2007	2007	2008	2014	2014	2012
Диапазон	C	X	X	L	C	C
Частота сигнала, ГГц	5,3	0,4	9,65	1,2	5.405	5.35

Продолжение таблицы 22

Длина волны (см)	5,66	3,1	3,13	22,9	5,55	5,3
Поляризация	HH, VV, VH, HV	HH, VV, VH, HV	HH, VV, VH, HV	HH, VV, VH, HV	HH, VV, VH, HV	HH, VV, VH, HV
Угол падения, град	20-60	20-60	20-55	8-70	18.3 - 47.0	20-49
Ширина полосы обзора по наземной дальности, км	18-500	10-200	10/30/100	25/50/70/ 350	20/80/240/ 400	10/25/115 /220
Пространственное разрешение, м	3-100	1-100	1/3/6	1/3/6/10/1 00	4x5 5x20 25x80 20x5	1/3/9/25/5 0

Рекомендации по подбору исходных радарных данных

На основе выполненного анализа основных характеристик радарных снимков сформулированы следующие рекомендации по подбору исходных радарных данных для их использования с целью мониторинга деформаций земной поверхности:

1. Частотный диапазон – подбирается в зависимости от требуемой точности наблюдений и величин исследуемых деформаций, характера подстилающей поверхности и периода проведения мониторинга. Высокоточный мониторинг осуществляется с использованием данных X-диапазона, при значительной временной изменчивости поверхности во избежание временной декорреляции применяется L-диапазон.

2. Наиболее подходящим для мониторинга смещений поверхности вариантом поляризации сигнала, при которой получен снимок, являются одиночные (HH- или VV-) поляризации.

3. Пространственное разрешение РЛИ – максимально высокое 33(выше 20 метров).

4. Режим съемки – интерферометрический, высокоточный.

5. Ширина полосы обзора – максимальный пространственный охват, покрывающий всю территорию горного предприятия.

6. Угол падения сигнала – определяется в соответствии с геометрией наблюдаемых объектов, режимом и направлением съёмки.

7. Уровень обработки данных – L1.

По результатам анализа существующих радарных КА для проведения исследований выбраны следующие РСА:

– TerraSAR-X, обеспечивающий приемлемую периодичность наблюдений в X-диапазоне;

– ALOS PALSAR – архивные РЛИ, полученные при съёмке в L-диапазоне.

– Sentinel-1 – открытые и свободно распространяемые данные, полученные при съёмке в C-диапазоне.

Данные TerraSAR-X. TerraSAR-X – радарный спутник, разработанный Германским центром авиации и космонавтики (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. - DLR). Спутник TerraSAR-X был выведен на орбиту 15 июня 2007. Вместе со спутником TanDEM-X, запущенным 21 июня 2010 года, осуществляет съёмку земной поверхности в X-диапазоне при длине волны ~3.1 см (рисунок 11). Пространственное разрешение получаемых с TerraSAR-X данных зависит от режима, в котором ведётся съёмка, и находится в пределах от 25 см до 40 м (таблица 23). Периодичность съёмки составляет 11 суток. В рамках данного исследования использованы данные в режиме съёмки StripMap (таблица 24). Съёмка со спутника TerraSAR-X выполнялась в течение 2 периодов: июль – сентябрь 2015 года и июнь – сентябрь 2016 года. В результате было получено 16 снимков на следующие даты: 2015.07.08, 2015.07.19, 2015.08.10, 2015.08.21, 2015.09.01, 2015.09.12, 2016.06.13, 2016.06.24, 2016.07.05, 2016.07.16, 2016.07.27, 2016.08.07, 2016.08.08, 2016.08.18, 2016.08.29, 2016.09.09. Данное количество является минимальным при применении высокоточных многопроходных методов интерферометрической обработки радиолокационных изображений. Получение большего числа снимков было невозможно из-за ограниченного объема выделенных финансовых средств.

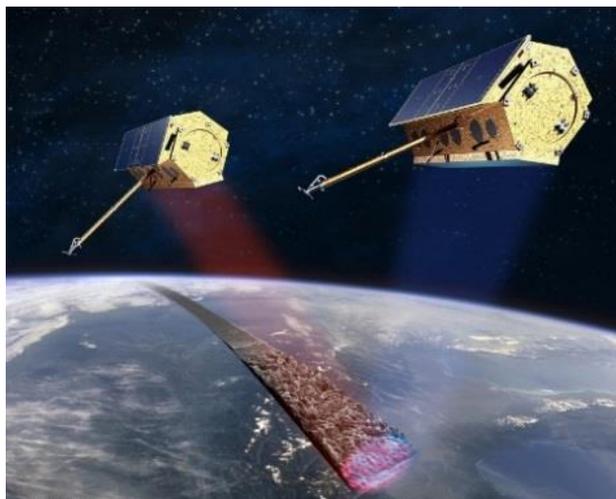


Рисунок 11 - Созвездие радарных спутников TerraSAR-X и TanDEM-X

Таблица 23 – Характеристики режимов съемки TerraSAR-X

Режим съёмки	Пространственное разрешение (м)	Ширина полосы съёмки (км)	Поляризация
Staring SpotLight (ST)	0.25	4 × 3.7	VV или HH
High Resolution SpotLight (HS)	1	10 × 5	VV или HH, HH+VV
SpotLight (SL)	2	10 × 10	VV или HH, HH+VV
StripMap (SM)	3	30 × 50	VV или HH
ScanSAR (SC)	18.5	100 × 150	VV или HH
Wide ScanSAR (WS)	40	270 × 200	VV или HH

Таблица 24 - Характеристики исходных данных TerraSAR-X.

Параметры	Характеристики данных TerraSAR-X
Диапазон радиоволн	X-диапазон (длина волны 3.1 см)
Режим съёмки	Широкополосный режим высокого разрешения - Strip Map
Пространственное разрешение	3 м
Поляризация	HH (одинарная горизонтальная)
Направление орбиты	Нисходящее
Номер орбиты	123

Данные ALOS PALSAR. В качестве исходных архивных данных были использованы радарные снимки ALOS PALSAR. Космический аппарат ALOS был разработан Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA)

(рисунок 12). Спутник запущен 24 января 2006 года и функционировал до 2011 года. Расположенный на его борту радиолокатор PALSAR вёл съёмку поверхности в L-диапазоне при длине волны ~ 23.5 см (рисунок 13) [100]. Пространственное разрешение снимков ALOS PALSAR находится в пределах 7-100 м для различных режимов съёмки (таблица 25). Для получения интерферометрических данных используется режим с высоким пространственным разрешением (Fine Mode), реализованный в двух вариантах: Fine Beam Single (FBS) и Fine Beam Dual (FBD). Характеристики данных ALOS PALSAR, использованных в данном исследовании, представлены в таблице 26. В работе использована серия из 19 снимков ALOS PALSAR за период с 2007 по 2011 гг. на следующие даты: 2007.01.17, 2007.03.04, 2007.09.04, 2007.10.20, 2008.01.20, 2008.03.06, 2008.07.22, 2008.09.06, 2009.01.22, 2009.03.09, 2009.07.25, 2009.09.09, 2009.10.25, 2010.04.27, 2010.06.12, 2010.07.28, 2010.09.12, 2011.01.28, 2011.03.15



Рисунок 12 - Спутник ALOS

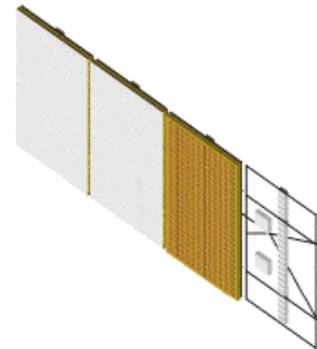


Рисунок 13 - PCA PALSAR

Таблица 25 – Характеристики режимов съёмки ALOS PALSAR

Режим съёмки	Пространственное разрешение (м)	Ширина полосы съёмки (км)	Поляризация
Fine Beam Single (FBS)	10	70	HH, VV
Fine Beam Dual (FBD)	20	70	HH+HV VV+VH
ScanSAR	100	250-350	HH, VV
Polarimetric	30	30	HH+HV+VV+VH

Таблица 26 - Характеристики исходных данных ALOS PALSAR

Параметры	Значение
Диапазон радиоволн	L-диапазон (длина волны 23.5 см)
Режим съёмки	FineBeamSingle (FBS) / FineBeamDual (FBD)
Пространственное разрешение	7 м / 15 м
Поляризация	HH (одинарная горизонтальная)
Направление орбиты	Восходящее
Размер сцены	70 x 70 км

Данные Sentinel-1. Группа космических аппаратов Sentinel разработана Европейским космическим агентством (ESA – European Space Agency) в рамках программы Copernicus [101, 102]. В состав семейства Sentinel входит Sentinel-1 – созвездие из 2-х радарных спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B (рисунок 14). Sentinel-1A был выведен на орбиту 3 апреля 2014 года, Sentinel-1B – 25 апреля 2016 года. На борту спутников Sentinel-1 установлен радар с синтезированной апертурой C-SAR, который ведёт съёмку в C-диапазоне с длиной волны ~ 5.5465763 см (рисунок 15). Пространственное разрешение данных меняется от 5 до 40 м в зависимости от режима съёмки (таблица 27). Периодичность съёмки достигает 1-4 дней в зависимости от территории зондирования. В данном исследовании использованы снимки, полученные в режиме интерферометрической съёмки (IW – Interferometric Mode). Размер пикселя снимка, полученного в данном режиме, составляет 5×20 м при ширине полосы 250 км, значение угла наклона меняется от 26° до 46° [101]. Характеристики исходных данных представлены в таблице 28.

Получение данных осуществляется с помощью информационного ресурса Sentinel Data Hub, разработанного Европейским космическим агентством [103]. Каталог Sentinel Data Hub открыт для всех пользователей и включает данные со спутников Sentinel-1 (A и B), Sentinel-2 и Sentinel-3. Поиск снимков осуществляется по следующим параметрам: период съёмки, период поступления данных в каталог, тип продукта (в соответствии с уровнем обработки), режим съёмки. Подбор снимков Sentinel-1 осуществлялся с

соблюдений требований к исходным данным при интерферометрической обработке (соответствие параметров орбиты, временной и пространственный базис). Кроме того, учитывался период съёмки: в связи с тем, что территория исследования большую часть года покрыта снегом, были подобраны данные на летний сезон. В итоге было отобрано 9 снимков на следующие даты: 2015.08.11, 2015.08.18, 2015.08.23, 2015.09.04, 2015.09.11, 2015.09.16, 2015.09.19, 2015.09.23, 2015.09.28.



Рисунок 14 - Спутник Sentinel-1A

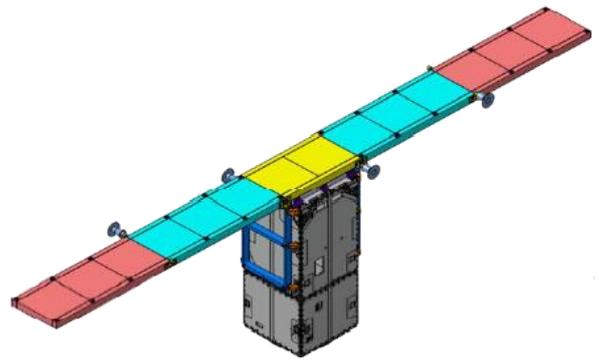


Рисунок 15 - PCA C-SAR

Таблица 27 – Характеристики режимов съёмки Sentinel-1

Режим съёмки	Пространственное разрешение (м)	Ширина полосы съёмки (км)	Поляризация
Strip Map (SM)	5 x 5	80	HH+HV VV+VH HH, VV
Interferometric Swath (IW) Wide	5 x 20	250	
Extra-Wide Swath (EW)	20 x 40	400	
Wave (WV)	5 x 5	20 x 20	VV, HH

Таблица 28 – Характеристики исходных радарных снимков Sentinel-1

Параметры	Характеристики данных Sentinel-1
Диапазон	C-диапазон
Длина волны	5.5465763 см
Режим съёмки	Interferometric Mode (IW)
Пространственное разрешение	5×20 м
Поляризация	VH, VV
Уровень обработки	L1 SLC
Формат	TIFF

Цифровая модель рельефа. Ряд этапов обработки радарных данных включает использование цифровой модели рельефа. В качестве опорного рельефа могут быть использованы ЦМР, построенные на основе данных наземных геодезических наблюдений, аэрофотосъёмки, лазерного сканирования, радиолокационного зондирования, радиометрической съёмки. По результатам анализа существующих глобальных ЦМР было принято решение использовать в качестве опорного рельефа данные ASTER GDEM (ASTER GDEM is a product of METI and NASA) как единственной глобальной ЦМР, покрывающей заполярные и территории и находящейся в открытом доступе. ASTER GDEM охватывает исследуемые в данной работе территории, обладает высокой точностью и при этом предоставляется на бесплатной основе [104]. Получение данных осуществляется с использованием ресурса EarthExplorer [105].

4.3 Интерферометрическая обработка радарных снимков

При интерферометрической обработке снимков информация о зондируемой поверхности извлекается из разности фаз полученных радарных снимков. Результирующая интерферометрическая фаза зависит от геометрии съёмки (положений РСА на орбите, топографии зондируемой поверхности), смещений земной поверхности и изменений характера обратного рассеяния, произошедших в период между циклами съёмки, неоднородности атмосферы. Таким образом, интерферометрическая фаза состоит из следующих компонентов [97]:

$$\varphi = 2\pi k + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{defo}} + \varphi_{\text{orb}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{scat}} + \varphi_{\text{noise}} \quad (7)$$

где $2\pi k$ – фазовая неоднозначность (целое число полных фазовых циклов); φ_{topo} – фазовый набег за счёт обзора поверхности под двумя разными углами, описывает высоту над опорной поверхностью; φ_{defo} – изменение фазы в результате смещения поверхности в период между съёмками; φ_{orb} – включает фазу горизонтальной («плоской») опорной поверхности и остаточный сигнал за счёт ошибок орбиты; φ_{atm} – атмосферная задержка сигнала, влияние неоднородности атмосферы; φ_{scat} – изменение отражательных характеристик

поверхности вследствие временной и/или пространственной декорреляции; Φ_{noise} – остаточный шум, возникающий в результате теплового шума, ошибок корегистрации и интерполяции.

Методы интерферометрической обработки. Классический метод дифференциальной интерферометрии получил активное развитие и на данный момент имеет несколько расширенных и усовершенствованных алгоритмов. Основными методами интерферометрической обработки радарных данных сегодня являются:

- Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) - дифференциальная интерферометрия;
- Small Baseline (SBAS) - метод малых базовых расстояний;
- Persistent Scatterers (PSI) - метод постоянных отражателей;
- Polarimetric Interferometric Synthetic Aperture Radar (PolInSAR) – поляриметрическая интерферометрия.

Интерферометрия постоянных отражателей (PSI – Persistent Scatterer Interferometry) основана на использовании устойчивых отражателей или постоянных рассеивателей радиосигнала для анализа серий интерферометрических пар РЛИ. Для обработки требуется серия из как минимум 30 радарных снимков. Выделение точек с постоянным характером рассеивания выполняется на основе анализа временных изменений значений амплитуды каждого пикселя в пределах области интереса. Значения амплитуды практически нечувствительны к влиянию атмосферы, ошибок опорной ЦМР, неточности орбитальных данных и других факторов, вносящих существенный вклад в итоговое значение фазы (формула 3). Таким образом, стабильность амплитуды используется в качестве индикатора стабильности фазы. Точность оценки смещений при использовании технологии интерферометрии постоянных отражателей составляет 2-4 мм по высоте [31]. Последовательность обработки данных при использовании метода PSI включает следующие этапы:

1. Корегистрация РЛИ: привязка серии РЛИ к одному снимку;

2. Выбор точек – постоянных отражателей;
3. Расчёт разности фаз для выбранных точек.

Технология интерферометрии малых базовых линий также использует серии интерферометрических пар РЛИ. Малый пространственный базис между снимками (<200 м) способствует уменьшению геометрической декорреляции. Кроме того, влияние ошибок опорной ЦМР ограничено из-за большой высотной неоднозначности – разницы высот, приводящей к сдвигу фазы 2π . Выбор пикселей, участвующих в обработке, основан на анализе пространственной когерентности в пределах окна оценки. Усреднение РЛИ с одной стороны снижает его пространственное разрешение, а с другой – уменьшает влияние шума.

Этапы интерферометрической обработки:

1. Совмещение основного (master) и дополнительного (slave) радиолокационных снимков, образующих интерферометрическую пару.
2. Спектральная фильтрация неперекрывающихся областей спектра 2-х снимков по азимуту и по дальности, возникающих из-за разницы в углах зондирования, для увеличения отношения сигнал/шум.
3. Построение интерферограммы - разностно-фазовой картины поверхности - путём перемножения основного и вспомогательного РЛИ. Интерферограмма отображается в виде фрингов, цвет которых соответствует одинаковым значениям фазы.
4. Расчёт и проверка когерентности/
5. Корректировка фазы: - сглаживание интерферограммы - вычитание фазовой составляющей горизонтальной поверхности; - исключение фазы рельефа, построенной на основе ЦМР, – при расчёте смещений.
6. Фильтрация интерферограммы для уменьшения фазового шума.
7. Развёртывание фазы – пересчёт относительных значений фазы, лежащих в диапазоне $[0;2\pi)$, в абсолютные значения.
8. Преобразование абсолютных значений фазы: - в абсолютные высотные значения рельефа с получением цифровой карты рельефа; - в относительные

высотные значения – значения смещений земной поверхности с получением карты смещений.

Программное обеспечение. Для обработки РЛИ используются различные виды программного обеспечения, такие как: - программное обеспечение (ПО) для обработки данных дистанционного Земли; - специализированное ПО для обработки РЛИ; - геоинформационные системы (ГИС).

Интерферометрическая обработка радарных снимков выполняется в специализированном программном обеспечении. На сегодняшний день лидерами в данной области являются программные продукты SARscape, Gamma, ERDAS. Эти полнофункциональные программные продукты, содержащие набор инструментов для выполнения всех основных этапов обработки радарных данных. Основная трудность связана с тем, что данное ПО является коммерческим, что ограничивает возможности его использования в малобюджетных проектах.

Альтернативным вариантом являются бесплатное программное обеспечение. К числу наиболее часто используемых относятся DORIS и SNAP (Sentinel-1 Toolbox). Данные программные продукты обладают базовыми возможностями обработки радарных снимков, при этом существуют определённые ограничения в наборе функций. Так, например, в случае использования SNAP развертка фазы выполняется в стороннем ПО Snaphu, а обработка по методу PS - в StamPS. Таким образом, применение бесплатного программного обеспечения подразумевает, как правило, комплексное использование нескольких программных продуктов. Постобработка осуществляется средствами геоинформационных систем.

4.4 Методика обработки радарных данных для решения задач деформационного мониторинга

На основе выполненного анализа разработана методика обработки радарных данных включающая следующие этапы:

1. Подготовка снимков: подбор и загрузка данных.

2. Интерферометрическая обработка с целью определения смещений.
3. Тематическая обработка для получения пространственных данных на территорию исследования.
4. Постобработка: векторизация, упрощение геометрии, сглаживание контуров и т.д.
5. Визуализация результатов - построение карт.

Разработанные рекомендации к выбору радарных снимков, соответствующий им набор исходных данных и его обоснование представлены в разделе 4.2. Особенностью предлагаемого подхода является совместный анализ данных, полученных в L, C и X-диапазонах, а также использование открытых данных – радарных снимков с Sentinel-1 и программного обеспечения SNAP и QGIS.

Обработка данных ALOS PALSAR и TerraSAR-X. На первом этапе была проведена обработка серии архивных снимков, полученных со спутника ALOS PALSAR за период с января 2007 года по март 2011 года. Вследствие ограниченного количества пригодных для обработки снимков был использован метод наименьших базовых линий, менее требовательный к необходимому объему наблюдений.

В процессе обработки снимков ALOS PALSAR удалось выполнить с удовлетворительным качеством развертку фазы для интерферометрических пар, составленных из снимков разных лет и разделенных длительным интервалом во времени, что позволяло рассчитать произошедшие в зимний период деформации, исходя из фазового набега в интерферометрической паре.

При анализе полученных материалов было установлено, что снимки, выполненные даже при минимальном снежном покрове, обладают низкой корреляцией и непригодны для обработки. Таким образом, съёмка, проводимая для регулярных космических радарных наблюдений, возможна только в период полного отсутствия снежного покрова на исследуемой территории, который длится, как правило, с конца июня до двадцатых чисел сентября [78-81].

С учётом обнаруженных на снимках зон радиолокационной тени, было принято решение использовать для дальнейшей съёмки нисходящую орбиту, так как в этом случае радиолокационный луч, направленный с востока на запад, обеспечивает наблюдение за рядом важных объектов, таких как подработанный борт Центрального карьера с углом наклона выше 70° , обращенный на восток.

Для интерферометрической обработки данных TerraSAR-X также был выбран метод SBAS в связи с тем, серия исходных данных состояла из 16 снимков. Обработка снимков ALOS PALSAR и TerraSAR-X осуществлялась с использованием программного обеспечения ENVI/SARscape в рамках договора с компанией «Совзонд» [39].

В результате обработки были определены вертикальные деформации земной поверхности. Расчет горизонтальных смещений в направлении запад – восток не мог быть выполнен, так как он требует наличия снимков, полученных как на нисходящих, так и на восходящих орбитах. Определение деформаций выполнено по состоянию на каждый момент проведения космической съёмки относительно состояния в момент первой съёмки для всего исследуемого участка. Исключение составили незначительные по площади территории, в состав которых входят области радиолокационной тени и участки с низкой когерентностью радиолокационных изображений (например, участки, где снежный покров сохраняется в летнее время).

Обработка данных Sentinel-1. Разработанная методика для обработки данных Sentinel основана на использовании открытого и бесплатного программного обеспечения. Интерферометрическая и тематическая обработка выполнены в SNAP Sentinel-1 Toolbox [106]. Sentinel Toolbox - открытое и свободно распространяющееся программное обеспечение для обработки данных дистанционного зондирования Земли. Набор программ Sentinel Toolbox, поддерживающих обработку данных с каждого спутника Sentinel, реализован на платформе Sentinel Application Platform (SNAP). Обработка радарных данных ведётся в Sentinel-1 Toolbox. S1TBX поддерживает форматы

данных большинства радарных спутников и включает инструменты для выполнения основных этапов их обработки. Исключение составляет развертка фазы, выполняемая в программе Snaphu [107]. При обработке данных Sentinel-1 использованы снимки, полученные с разных орбит съёмки. Деформации определялись за период между первым и каждым последующим циклами съёмки отдельно для данных с каждой орбиты.

Для обработки амплитудной составляющей были использованы возможности текстурного анализа, алгоритмы неконтролируемой классификации изображений, методы построения композитных изображений, дешифрирование в ручном и полуавтоматическом режиме. Предварительная обработка данных была выполнена включала геокодирование, орторектификацию, радиометрическую коррекцию, устранение спекл-шумов. Для улучшения изображения была выполнена его дополнительная фильтрация. Тематическая обработка включала визуальное и полуавтоматическое дешифрирование с использованием дополнительных материалов. Набор исходных данных включал топографические карты на территорию Мурманской области, данные OpenStreetMap, результаты натурных измерений карьера «Центральный» [74-76, 82-83, 98, 99].

Постобработка и визуализация. Этап постобработки включал работу с векторными данными (генерализация, сглаживание геометрии и т.д.) и построение карт деформаций земной поверхности. Постобработка полностью выполнена в программе QGIS - свободной кроссплатформенной геоинформационной системе [108]. Данная полнофункциональная ГИС предназначена для создания и редактирования данных, производства карт, выполнения аналитических операций.

Результатами проводимой работы являются наборы ГИС слоев с пространственными данными. Для визуализации результатов обработки использовалась информационно-аналитическая система «Регион-В», представляющая собой модульную распределённую систему, состоящую из серверного и клиентского приложений, геоинформационного сервера,

серверов баз данных. Все компоненты разработаны с использованием программного обеспечения с открытым исходным кодом, не требующих покупки лицензии. Модульный принцип построения системы позволяет гибко распределять ресурсы и легко интегрироваться со сторонними системами. Система также позволяет организовать удалённый доступ к данным, без необходимости прямой передачи файлов, совместное редактирование материалов и организацию разграниченного доступа к данным [74, 98, 99]. Для организации хранения слоев используется темпоральная модель данных (ТМД), позволяющая хранить сведения о жизненном цикле данных. ТМД применяется для хранения как исходных данных (RGB представление спутниковых снимков), так и результатов тематической обработки спутниковых снимков. Ключевой особенностью применяемой ТМД является её битемпоральность, что предполагает хранение как времени актуальности определённых данных, так и транзакционного времени (момент записи данных в хранилище), что в значительной степени облегчает поиск результатов, согласованных по времени.

4.5 Анализ результатов обработки радарных данных

Пространственный охват сцены позволил выполнить анализ обширной площади, включающей не только карьер «Центральный», но также и Коашвинский карьер.

Оценка деформаций на территории карьера «Центральный»

По результатам анализа радарных данных выявлено, что для большей части территории Центрального карьера (и восточной части Расвумчоррского рудника) за период наблюдений характерны оседания земной поверхности, но при этом присутствуют локальные очаги поднятий. На рисунках 16-21 представлены примеры карт деформаций, построенные по данным TerraSAR-X, Sentinel-1 и ALOS PALSAR и совмещенные с планом карьера. Карты деформаций на остальные даты съёмки представлены в Приложениях А, Б и В.

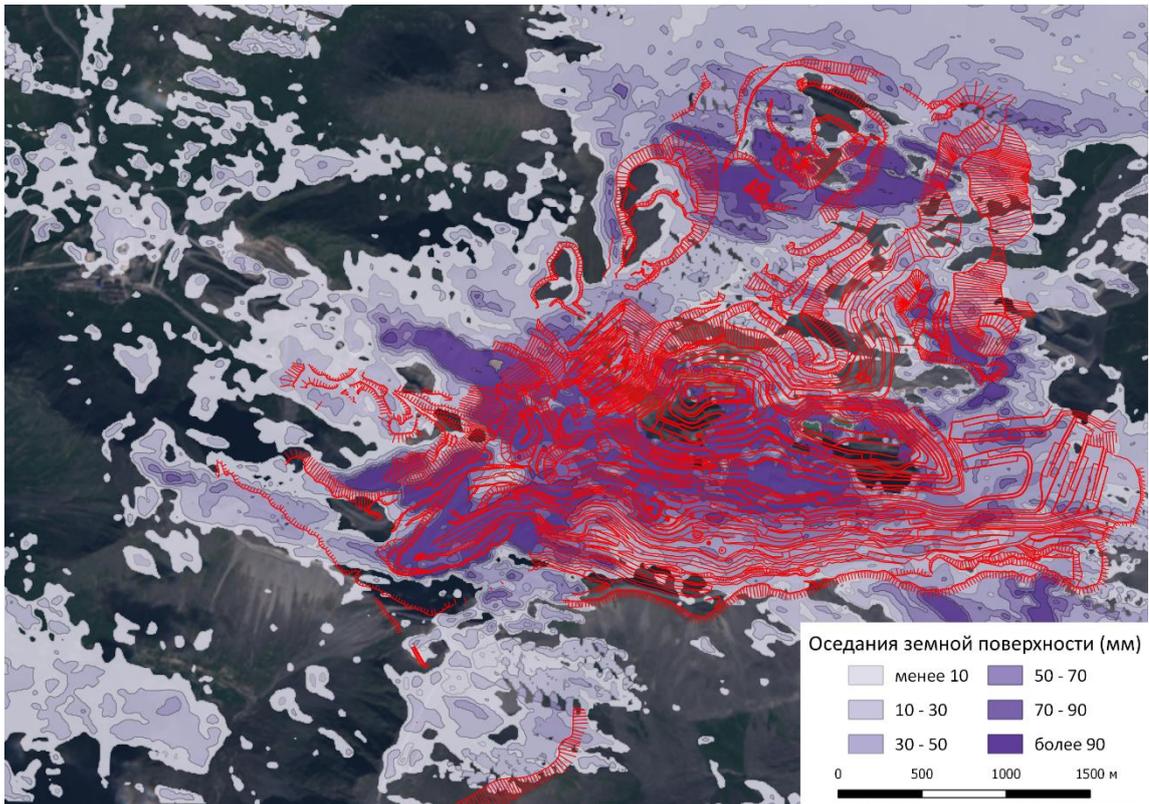


Рисунок 16 – Карта оседаний земной поверхности по данным TerraSAR-X за период наблюдений 08.07.2015 – 09.09.2016

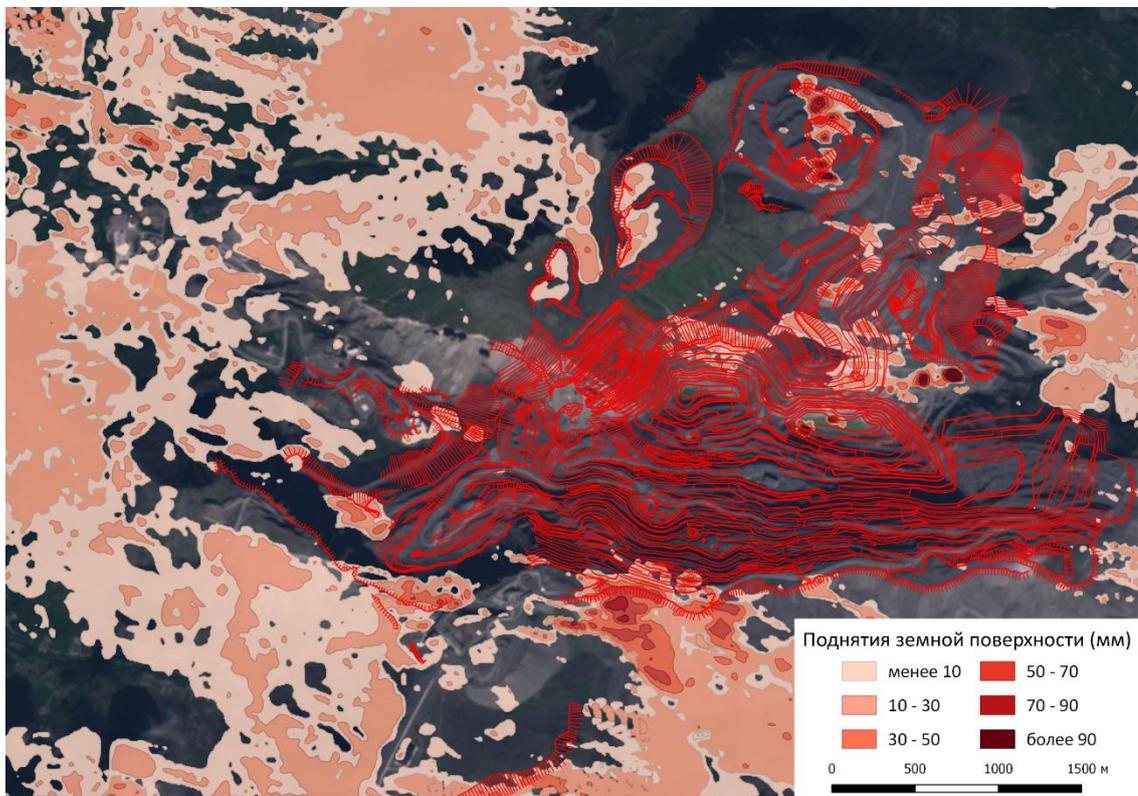


Рисунок 17 – Карта поднятий земной поверхности по данным TerraSAR-X за период наблюдений 08.07.2015 – 09.09.2016

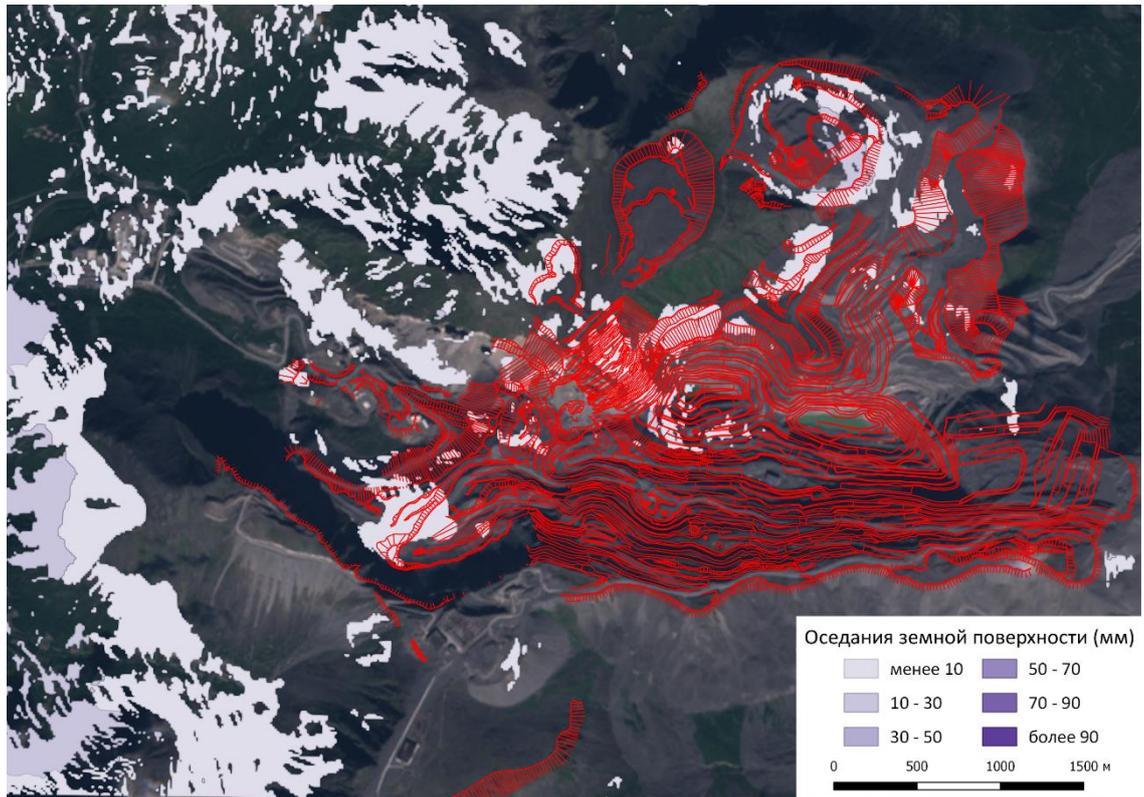


Рисунок 18 – Карта оседаний земной поверхности по данным Sentinel-1 за период наблюдений 11.08.2015 – 23.08.2015

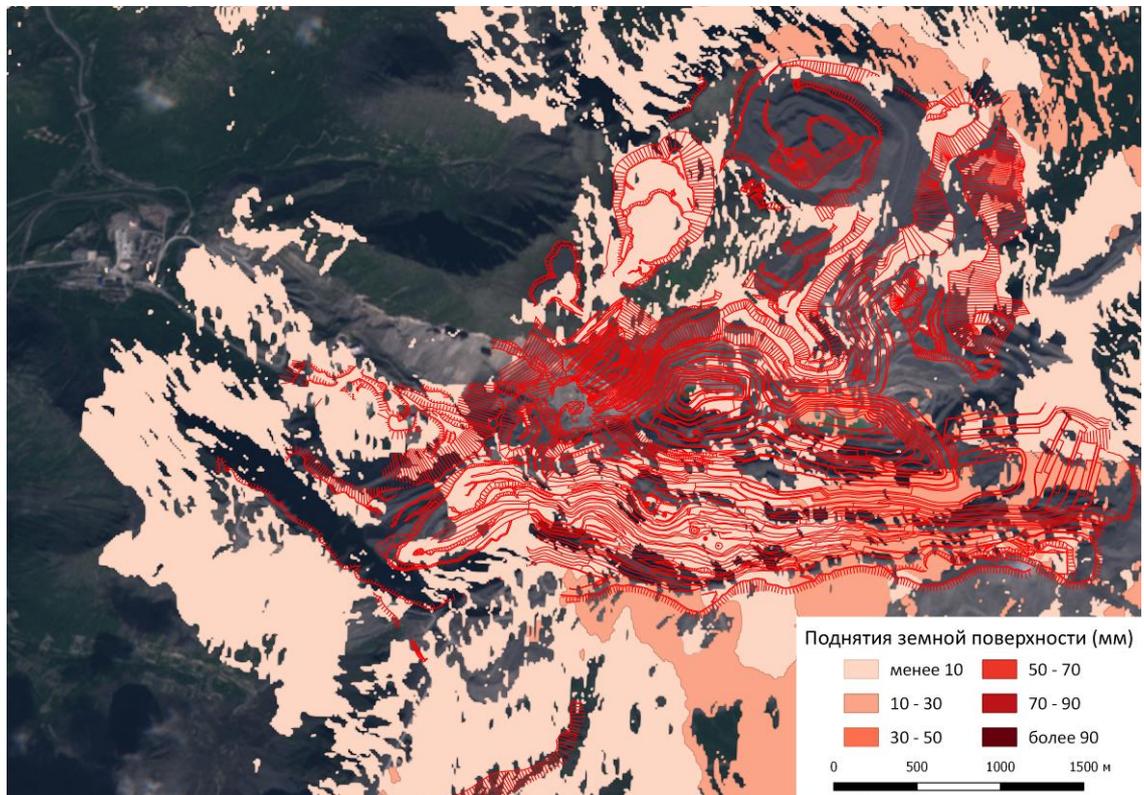


Рисунок 19 – Карта поднятий земной поверхности по данным Sentinel-1 за период наблюдений 11.08.2015 – 23.08.2015

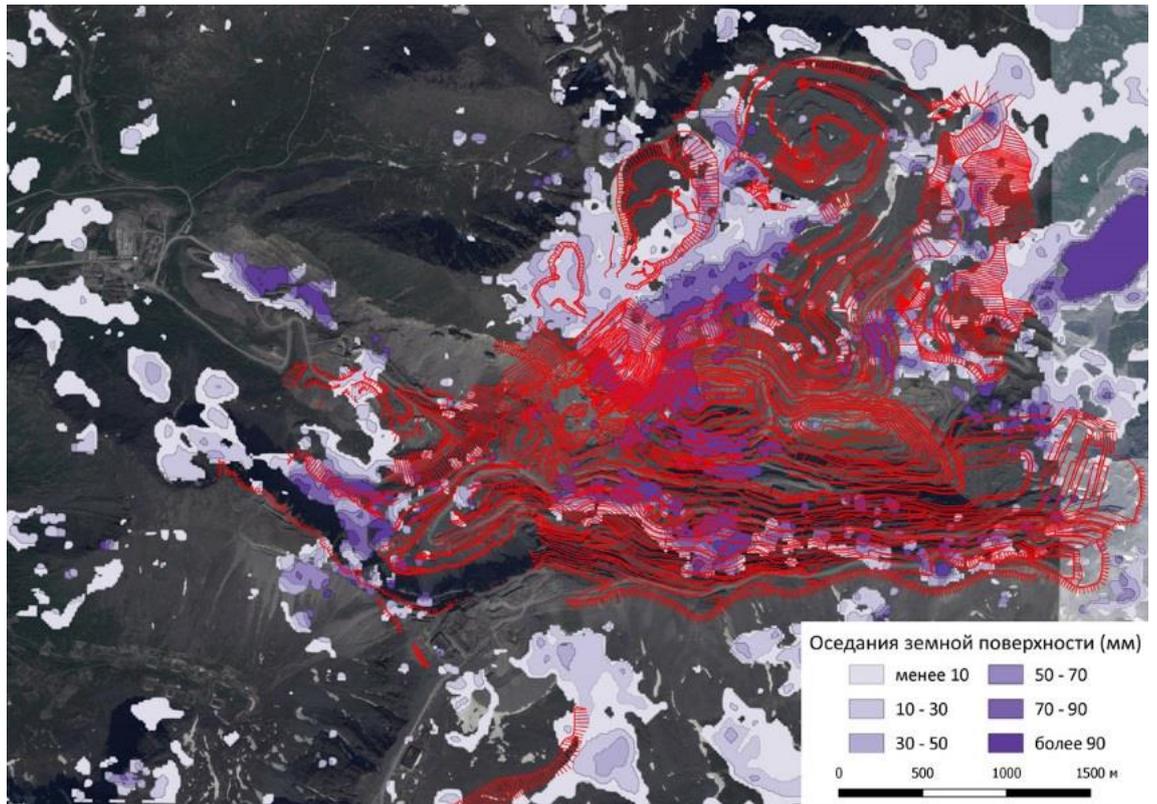


Рисунок 20 - Карта оседаний земной поверхности по данным ALOS PALSAR за период наблюдений 04.09.2007-12.09.2010

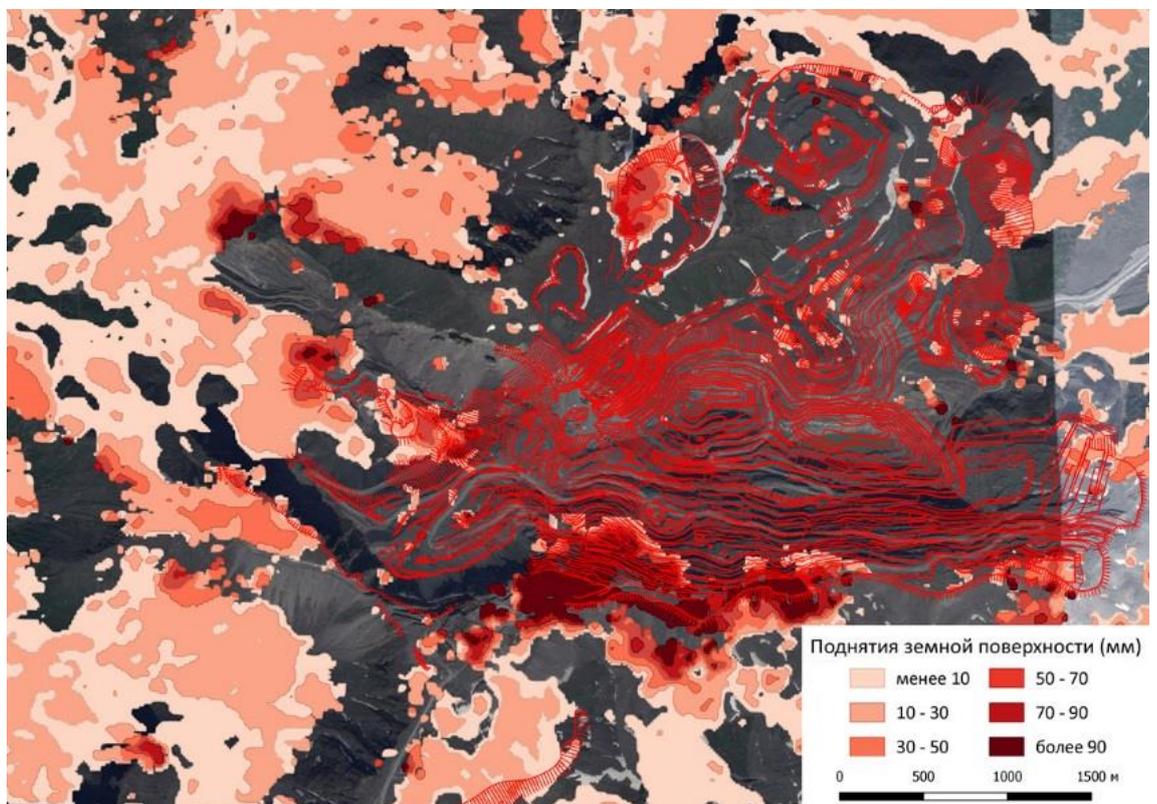


Рисунок 21 - Карта поднятий земной поверхности по данным ALOS PALSAR за период наблюдений 04.09.2007-12.09.2010

Детальный анализ смещений на территории Центрального карьера за 2015-2016 годы показал, что наибольшие зоны оседания характерны для западной части карьера: наиболее интенсивные оседания затронули часть северо-западного борта, что связано с подземными работами на Расвумчоррском руднике. Наземные наблюдения за деформацией поверхности борта невозможны по соображениям безопасности проведения работ. Радарная интерферометрия является в данный момент единственным методом сбора информации о протекании процессов деформации поверхности.

Вторая массивная зона сформировалась на насыпной части дороги с Центрального на Расвумчоррский рудник - здесь оседания вызваны естественной усадкой насыпной массы. В северной части карьера выделяется зона оседаний, охватывающая отвал №11, с поднятием в её центральной части, обусловленным ведением работами по складированию отвальной массы. Зона оседаний в центральной части карьера связана с ведением горных работ. Осадки и пучения в южной части карьера сформировались в месте нахождения старого отвала, деформации которого продолжаются в направлении на юг. В результате оценки можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее высокие величины оседаний приурочены к ведению подземных горных работ подошедшим к восточной границе Центрального карьера, а так же ведение добычных работ на самом карьере.
2. Вторые по величине оседания связаны естественной усадкой насыпной массы дорог и отвалов.
3. Зоны поднятия выявлены в местах складирования горной массы.

Более полная и детальная оценка деформаций на территории карьера требует совместного анализа помесечных планов ведения горных работ и космических данных, для исключения участков проведения горных работ на момент съёмки.

Оценка деформаций на территории Коашвинского карьера

Для территории Коашвинского карьера характерны процессы оседания земной поверхности. Между Коашвинским карьером и карьером «Центральный» выявлены два очага оседаний земной поверхности. Анализ смещений на территории Коашвинского карьера и отвалов №2 и 3 в период 2015-2016 гг. показал, что наибольшие оседания наблюдаются на отвалах № 2 и 3, а также на нижних горизонтах северного (северо-восточного) борта. Кроме того, вертикальные смещения имеют распространение на восточном и юго-восточном бортах. Оседания на данных участках связаны с наличием слоя четвертичных отложений. Помимо оседаний в районе западного борта имеются участки поднятий, граничащие с незначительными оседаниями, причиной возникновения которых является наличие осыпей. Большая часть оседаний в карьере сконцентрирована в районе ведения горных работ. Для более точной интерпретации и установления закономерностей между оседаниями и проведением горных работ необходимо сопоставить и проанализировать помесечные планы и результаты обработки космических снимков. На территории карьера в октябре 2016 года заложена наблюдательная станция в составе 23 пикетов. Во время проведения космической съемки наземные наблюдения за деформацией земной поверхности на Коашвинском карьере не проводились. При проведении таких наблюдений в будущем их результаты можно будет сравнить с тенденциями процессов деформации, выявленными по результатам обработки космических снимков. Участки заложения реперов были проанализированы более подробно:

1. Северо-западный борт. Северо-западный борт сложен крепкими скальными породами и уже стоит относительно долгое время. Результаты радарной съемки показали, что в течение года на нем наблюдаются оседания. Учитывая, что оседания имеют локальное распространение, то сдвижение прибортового массива может быть связано с наличием разломов, либо движением блоков по неблагоприятно ориентированным нарушениям.

2. Восточный борт. Смещения на данном участке связаны, главным образом, с наличием четвертичных отложений и постоянной откачкой подземных вод.
3. Отвал № 2. Наибольшие смещения наблюдаются на верхних площадках, за нижней бровкой отвала вертикальные смещения снижаются, что свидетельствует о деформировании непосредственно отвальной массы, а не пород основания.
4. Южный борт. Незначительные деформации на данном участке обусловлены расположением основной системы съездов.
5. Северо-восточный и северный борта. Интенсивный процесс деформирования на данных участках связан с активным ведением горных работ: подвиганием уступов и взрывными работами.

Оценка результатов обработки радарных данных

Анализ данных ALOS PALSAR позволил: - определить границы временного интервала, в течение которого возможно проведение съемки; - выбрать параметры и направление съемки (направление орбиты космического носителя и угол отклонения радиолокационного луча), при которых основные наблюдаемые объекты оказываются вне зоны радиолокационной тени; - проверить возможности непосредственного расчета деформаций, произошедших в течение зимнего периода, и подтвердить непригодность использования радарных данных, полученных при наличии снежного покрова [78-80].

Анализ данных TerraSAR-X и Sentinel-1 позволил выявить площади оседаний, локальные очаги поднятий и горизонтальные смещения как на Центральном карьере, так и на других объектах горного отвода. Сравнение результатов обработки данных TerraSAR-X и Sentinel-1, полученных на близкие даты, продемонстрировали их высокую сходимость (рисунок 22). Более точное сопоставление данных не представлялось возможным, т.к. съёмка со спутников выполнена в разные дни и, соответственно, охватывает различные временные промежутки. Разница при определении деформаций

также обусловлена различным пространственным разрешением и значениями когерентности.

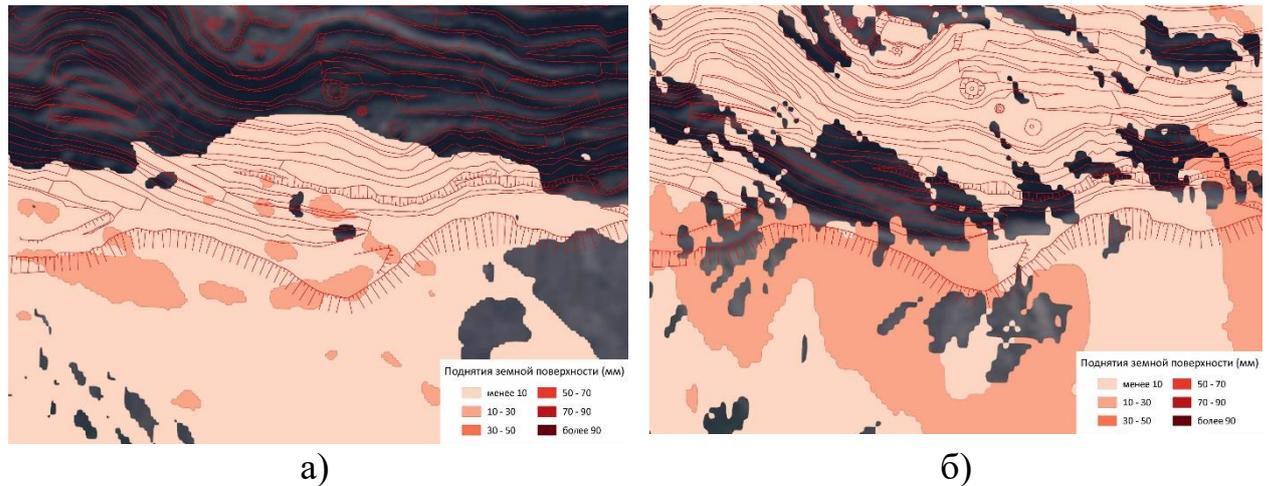


Рисунок 22 - Поднятия на участке южного борта Центрального карьера: а) по данным TerraSAR-X (07.08.2015-21.08.2015); б) по данным Sentinel-1 (11.08.2015-23.08.2015)

Анализ результатов обработки снимков Sentinel-1 подтвердил, что использование С-диапазона позволяет сохранить высокую когерентность в течение всего сезона наблюдений. Пространственное разрешение (20 м) дает возможность производить анализ обширных площадей, выявляя участки для более детального анализа на основе данных высокого разрешения и результатов наземных наблюдений. Методы, примененные при тематической обработке амплитудного слоя, улучшили детальность дешифрирования, повысив точность и достоверность распознавания объектов (рисунок 23). Результаты обработки также позволили оценить дешифровочные свойства объектов горного отвода и прилегающих территорий (таблица 32). Различные способы автоматического дешифрирования позволяют распознать те или иные объекты, но четкое выделение их границ и контуров в итоге все равно осуществляется силами оператора. Распознавание объектов осложнено в силу особенностей радарных изображений: трудности возникают из-за угла наклона съемки. Кроме того, возможность дешифрирования объектов зависит от их размера [75, 76, 98].

Таблица 29 - Анализ дешифровочных свойств объектов местности по данным радарной съёмки

Класс объектов	Дешифровочные свойства
Гидрография	Объекты площадной гидрографии были выделены по результатам контролируемой классификации, выполненной по радарному снимку. Лучше всего выделяются объекты площадью более 1500 м ² , с небольшими объектами возникают трудности. Точность выделения рек и каналов напрямую зависит от их ширины: хорошо дешифрируются объекты шириной более 10 м. Кроме того, дешифрирование может быть осложнено наличием прибрежных объектов, характером берегов. В связи с этим выделение объектов линейной гидрографии выполнялось исключительно вручную с использованием дополнительных материалов.
Населенные пункты и промышленные объекты	Выделение данных объектов осуществлялось в ручном режиме. Наилучшим образом дешифрируются здания и строения площадью от 1000 м ² .
Дорожная сеть	Автомобильные и железные дороги выделялись вручную с достаточной точностью, за исключением некоторых дорог, проходящих через населенные пункты и частично заслоненных зданиями. Кроме того, трудности возникают с определением количества путей железных дорог – они практически не распознаются. В целом лучше всего выделяются дороги шириной более 10 м.
Рельеф	По амплитудным изображениям отчетливо дешифрируется характер рельефа, очертания объектов: на территории карьера с высокой точностью выделяются уступы и откосы
Растительность	В процессе дешифрирования растительного покрова удается выделить объекты с четко установленными границами, например, городские парки. Для дешифрирования данного класса необходимо использование полной матрицы поляризации.

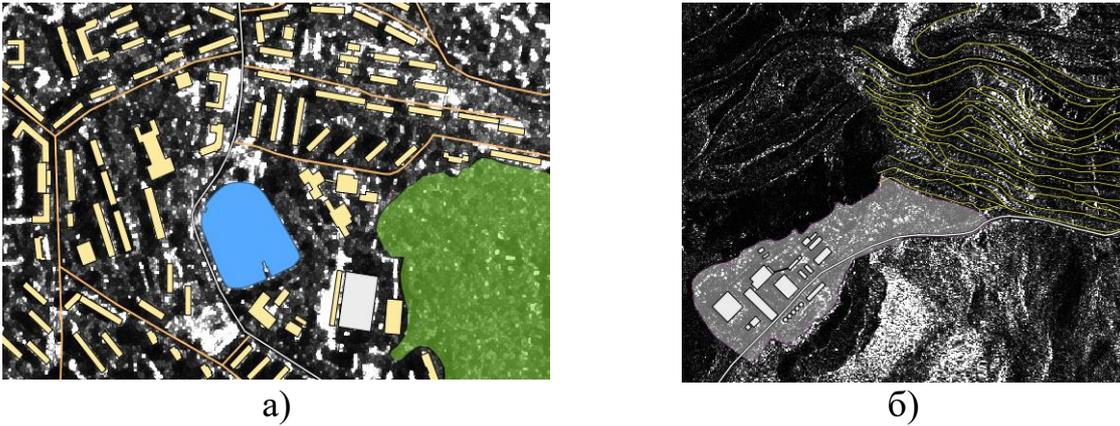


Рисунок 23 - Фрагмент дешифрованного снимка: а) жилой квартал г. Кировска; б) промплощадка и уступы карьера «Центральный»

Анализируя в целом результаты проведенных работ, необходимо отметить факторы, под воздействием которых определенная часть полученных данных не может быть признана достоверной и точной. В первую очередь это относится к расчету деформаций, произошедших в зимний период. При обработке снимков TerraSAR-X, в отличие от снимков ALOS PALSAR, не удалось корректно выполнить развертку фазы для интерферометрических пар, составленных из снимков разных лет. Это явилось следствием временной декорреляции радарных снимков, которой в большей степени подвержены снимки с высоким разрешением, полученные в диапазоне более коротких волн. В результате для расчета деформации за период между последней съемкой 2015 года и первой съемкой 2016 года была применена экстраполяция тренда, выявленного для каждого года в отдельности. Такой прием не во всех случаях можно признать корректным, так как направление тренда может измениться, в том числе в период, когда съемка не выполнялась. Результаты интерполяции можно проверить с помощью наземных наблюдений. Однако, радикальным решением этой проблемы являются более длинные серии наблюдений и их обработка с помощью метода постоянных рассеивателей, который не требует выполнять развертку фазы.

Важный компонент информации, используемой при расчете деформации земной поверхности методами радарной интерферометрии,

представляет цифровая модель рельефа подстилающей поверхности (ЦМР). Ее используют на различных этапах расчетов. В данном проекте была использована модель ASTER-GDEM (раздел 4.2). Однако в процессе выполнения расчетов выявилось, что за время, прошедшее с момента создания модели, на отдельных участках в зоне ведения горных работ произошли изменения рельефа, существенно превышающие уровень номинальной точности модели. В результате рассчитанные значения деформаций таких участков, в частности, район отвала №13 на территории Центрального карьера, требуют дополнительной проверки.

Еще одним негативным фактором, выявленным в процессе расчета деформаций, стал эффект переналожения радарного сигнала, который снижает точность замера смещений и точность геопривязки объектов. Этот эффект проявляется на склонах, особенно крутых, обращенных навстречу лучу радара. Для того, чтобы избежать переналожения на склонах и откосах, обращенных на восток, необходимо выполнять съемку с восходящих орбит, на которых луч радара обращен с запада на восток. В этом случае луч должен быть максимально приближен к вертикали ($18-20^\circ$), чтобы с другой стороны избежать эффекта тени.

Совместный анализ радарных данных разных частотных диапазонов

По результатам выполнения обработки набора исходных радарных снимков было подтверждено, что данные в L-диапазоне пригодны для выполнения ДМ даже при условии значительного временного промежутка между циклами съёмки, так L-диапазон является менее чувствительным к изменению свойств подстилающей поверхности в сравнении с X-диапазоном. В свою очередь, данные в X-диапазоне, полученные при меньшей длине волны, обеспечивают более высокую точность измерений деформаций земной поверхности, при условии сохранения временного базиса и особенно – при использовании РЛИ 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 ТПП, 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, X-диапазон – для высокоточного расчёта деформаций в пределах одного сезона наблюдений. В целом космическое радиолокационное зондирование рекомендуется использовать для площадного мониторинга деформационных процессов и выделения участков ТПП, на которых требуется проведение более детальных локальных наблюдений.

4.7 Выводы к главе

Использование возможностей космического радиолокационного зондирования для мониторинга заполярных месторождений, в частности, карьера «Центрального» потребовало решения вопросов установления требований к параметрам исходных радарных данных и их обоснование, а также разработки методики обработки радарных снимков и интерпретации результатов. Состав набора исходных данных выполнялся по результатам анализа современных возможностей космической радарной съёмки. Кроме того, были изучены и освоены на практике современные подходы к обработке радарных снимков и их программная реализация. На основе выполненного анализа сформулирована методика обработки радарных снимков для расчёта деформаций земной поверхности на территории исследования. Разработанная методика апробирована, результаты определения смещений земной поверхности позволили выявить участки оседаний и поднятий на территории карьера «Центрального». Оценка точности выполнена с использованием результатов наземных инструментальных маркшейдерских наблюдений и требует увеличения числа тестовых участков и методик выполнения интерферометрической обработки.

Проведённые исследования подтверждают возможность использования радиолокационных данных для проведения многолетнего деформационного мониторинга в районах Заполярья. При этом требуется тщательный подбор параметров космической радарной съемки и наиболее эффективные методы обработки наблюдений с учетом специфики территории. Требования к планированию радиолокационной съемки при организации мониторинга могут быть определены по результатам обработки многолетней серии архивных радарных данных. Точность оценки смещений зависит от длины используемой радиоволны и точности опорного рельефа. Применение открытых радарных данных Sentinel-1 расширяет оценку обстановки на ТГП, обеспечивая эффективность площадных деформационных наблюдений. Использование радарных данных, полученных в нескольких частотных диапазонах позволяет повысить точность и улучшить качество ДМ ТГП.

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 ТГП, требующих проведения более детальных высокоточных наблюдений. Разработана методика оценки деформаций

земной поверхности на ТГП, 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- БПЛА – беспилотный летательный аппарат;
- ГГС – государственная геодезическая сеть;
- ГИС – геоинформационная система;
- ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система
- ГТС – гидротехническое сооружение;
- ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли;
- ДМ – деформационный мониторинг;
- КА – космический аппарат;
- КРЗ – космическое радиолокационное зондирование;
- ЛА – летательный аппарат;
- МПИ – месторождение полезных ископаемых;
- МС ПТС – мониторинг состояния ПТС;
- НДС – напряженно-деформированное состояние;
- НЛС – наземное лазерное сканирование;
- ОПО – опасный производственный объект;
- ОРМ – открытая разработка месторождений;
- ПО – программное обеспечение;
- ПТС – природно-техническая система;
- РЛИ – радиолокационное изображение;
- РСА – радиолокатор с синтезированной апертурой;
- ТПП – территория горного предприятия;
- ТМД – темпоральная модель данных;
- ЦМР – цифровая модель рельефа;
- ЭПР – эффективная площадь рассеяния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королев В.А. Мониторинг геологической среды / В. Т. Трофимов. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 272 с.
2. Израэль Ю.А. Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка окружающей природной среды. Основы мониторинга / Ю.А. Израэль // Метеорология и гидрология. – 1974. – № 7. – с. 3-8.
3. Епишин В.К., Трофимов В.Т. Литомониторинг – система контроля и управления геологической средой / Е.М. Сергеев // Теоретические основы инж. геол. Социально-экономические аспекты. – М.: Недра. – 1985. – с. 243-250.
4. Сергеев Е.М. Инженерная геология – наука о геологической среде // Инж. геология. 1979. - № 1. – С. 1-9.
5. Маркшейдерская энциклопедия / Гл. ред. Л.А. Пучков. – М.: Издательство «Мир горной книги», 2006. – 605 с.
6. Гальперин А.М. Геомеханика открытых горных работ: Учебник для вузов. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. – 473 с.
7. Маркшейдерия: Учебник для вузов / Под ред. М.Е. Певзнера, В.Н. Попова. - М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. – 419 с.: ил.
8. ГОСТ Р 55535-2013 Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Общие технические требования к системам геодезического мониторинга [Электронный ресурс] // СС «Техэксперт». - 2018. - Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200104818>
9. Сергина Е.В. Комплексный мониторинг состояния природно-технических систем открытой разработки угольных месторождений: дис. ...канд. техн. Наук: 25.00.16 / Сергина Елена Викторовна. - СПб, 2015. – 165 с.
10. Бондарик Г.К. Ярг Л.А. Природно-технические системы и их мониторинг / Г.К. Бондарик // Инж. геол. – 1990. – № 5, с. 3-9.
11. Закон РФ №2395–1 «О Недрах»: [принят 21 февраля 1992г., посл. ред. 31.12.2014г.]. [Электронный ресурс] // ИПП Гарант.ру. – 2018. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/10104313/>.
12. Приказ Ростехнадзора от 11.12.2013 N 599 "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [Электронный ресурс] // СПС КонсультантПлюс. – 2018. - Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_165992/
13. ПБ-07-601-03 Правила охраны недр: [утв. Госгортехнадзором РФ 6 июня 2003г., посл. ред. от 30.06.2009 г.]. [Электронный ресурс] // ИПП Гарант.ру. – 2018. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/2159541>.
14. Постановление Госгортехнадзора РФ от 22.05.2001 N 18 «Об утверждении Положения о геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр» [Электронный ресурс] // СПС

КонсультантПлюс. – 2018. - Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_31973/.

15. Постановление Правительства РФ от 28.03.2012 N 257 (ред. от 25.12.2012) «О лицензировании производства маркшейдерских работ» [Электронный ресурс] // СПС КонсультантПлюс. – 2018. - Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_127959/.

16. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости: [утв. Госгортехнадзором РФ 21 июля 1970г.] – Л.: ВНИМИ, 1971. – 188 с.

17. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости. – Л.: ВНИМИ, 1987. – 118 с.

18. Постановление Госгортехнадзора РФ от 06.06.2003 N 73 «Об утверждении "Инструкции по производству маркшейдерских работ» [Электронный ресурс] // СПС КонсультантПлюс. – 2018. - Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_86463/

19. Орлов Г.В. Сдвигение горных пород и земной поверхности под влиянием подземной разработки: учебное пособие для вузов. – М.: Издательство «Горная книга», Издательство МГГУ, 2010. – 199 с.: ил.

20. Калесник С.В. Основы общего землеведения. - М.; Л.: Учпедгиз, 1947. - 484 с. [2-е перераб. изд. — М. : Учпедгиз, 1955 - 472 с.]

21. Панжин А.А., Панжина Н.А. Об особенностях проведения геодинимического мониторинга при разработке месторождений полезных ископаемых Урала с использованием комплексов спутниковой геодезии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2012. - № 6. - С. 46-55.

22. Курошев Г.Д. Геодезия и топография: учебник для студ. вузов / Г.Д. Курошев, Л.Е. Смирнов. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 176 с.

23. GEOG 862 - GPS and GNSS for Geospatial Professionals [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1828>

24. Зинченко О.Н. Беспилотные летательные аппараты: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования [Электронный ресурс] // Ракурс. – 2018. - Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=681>

25. Смирнов А.В., Обзор беспилотных летательных аппаратов для картографирования [Электронный ресурс] // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Геодезия, маркшейдерия, аэросъемка на рубеже веков», Москва, 2015.

26. Основы наземной лазерно-сканирующей съемки: Учеб. пособие /В.Н. Гусев, А.И. Науменко, Е.М. Волохов, В.А. Голованов; Санкт-Петербургский государственный горный университет. 2-е изд., испр. СПб, 2011. 80 с.

27. Наземное лазерное сканирование / В.А. Середович, А.В. Комиссаров, Д.В. Комиссаров, Т.А. Широкова. – Новосибирск: СГГА, 2009. – 261 с.

28. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М.: Радиотехника, 2010.
29. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. – М.: ИКИ РАН, 2011.
30. Баранов Ю.Б., Кантемиров Ю.И., Киселевский Е.В., Никифоров С.Э., Вергелес С.А., Билянский В.В. Мониторинг смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов с помощью комплекса космических и геодезических методов // Недропользование XXI век. 2009. № 1. С. 60-64.
31. Кантемиров Ю.И. Краткие теоретические основы радарной интерферометрии и ее многопроходных вариаций Ps и SBas // Геоматика. 2012. №1. С.22–26.
32. Васильев М.Ю., Ковязин А.В., Квятковская Е.Е., Пономаренко М.Р. Современные аспекты мониторинга деформаций земной поверхности при разработке месторождений открытым способом // Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Сборник научных трудов. 2017. С. 283-287.
33. Баранов Ю.Б., Кантемиров Ю.И., Киселевский Е.В., Болсуновский М.А. Построение ЦМР по результатам интерферометрической обработки радиолокационных изображений ALOS PALSAR // Геоматика. - 2008. - №1. - С. 37-45.
34. Баранов Ю.Б., Кантемиров Ю.И., Киселевский Е.В., Никифоров С.Э., Вергелес С.А., Билянский В.В. Мониторинг смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов с помощью комплекса космических и геодезических методов // Недропользование XXI век. 2009. № 1. С. 60-64.
35. Гафаров Н.А., Баранов Ю.Б., Ванярхо М.А., Филатов Д.М., Денисевич Е.В., Кантемиров Ю.И., Кулапов С.М., Фейгин А.Е., Горяйнв М.С., Киселевский Е.В., Никифоров С.Э. Использование космической информации в газовой промышленности. – М.: ООО «Газпром экспо», 2010. – 132 с.
36. Баранов Ю.Б., Горяйнов М.С., Кантемиров Ю.И., Киселевский Е.В., Кулапов С.М., Нохрин В.А. Преимущество космических радарных систем при выполнении маркшейдерских работ на нефтегазовых месторождениях (на примере Южно-Русского месторождения) // Геоматика. 2011. № 1 (10). С. 12-14.
37. Жантаев Ж.Ш., Фремд А.Г., Иванчукова А.В., Калдыбаев А.А., Нуракынов С.М., Кантемиров Ю.И., Никифоров С.Э. Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности над нефтегазовым месторождением Тенгиз // Геоматика. 2012. № 1. С. 61-71.
38. Кантемиров Ю. И., Камза А. Т., Бермуханова А. М., Тогайбеков А. Ж., Сапарбекова М. А., Никифоров С. Э. Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности на примере одного из нефтяных месторождений Мангистауской области Республики Казахстан // Геоматика. 2014. №4 (25). С. 46-58.

39. Компания «Совзонд» [Электронный ресурс]. – 2018. - Режим доступа: <https://sovzond.ru/>
40. Способ мониторинга смещений земной поверхности и деформаций сооружений на территории месторождения полезных ископаемых: пат. 2446411 Рос. Федерация; Общество с ограниченной ответственностью "Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - Газпром ВНИИГАЗ" (ООО "Газпром ВНИИГАЗ").
41. Способ поиска месторождений углеводородов: пат. 2435179 Рос. Федерация; Общество с ограниченной ответственностью "Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - Газпром ВНИИГАЗ" (ООО "Газпром ВНИИГАЗ").
42. Лысков И.А., Мусихин В.В., Кашников Ю.А. Мониторинг деформационных процессов земной поверхности методами радарной интерферометрии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2010. Т. 9. № 5. С. 11-16.
43. Кашников Ю.А., Мусихин В.В., Лысков И.А. Определение оседаний земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых по данным радарной интерферометрии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 4. С. 68-77.
44. Евтюшкин А.В., Филатов А.В. Оценка деформаций земной поверхности в районах интенсивной нефтедобычи Западной Сибири методом РСА интерферометрии по данным ENVISAT\ASAR и ALOS\PALSAR // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 46-53.
45. Васильев Ю.В., Филатов А.В. Выявление зон локальных деформаций методом радарной интерферометрии по результатам мониторинга на Самотлорском геодинамическом полигоне. // Маркшейдерский вестник. 2016. № 3 (112). С. 38-46.
46. Эпов М.И., Миронов В.Л., Чимитдоржиев Т.Н., Захаров А.И., Захарова Л.Н., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В. Наблюдение просадок поверхности земли в районе подземных угольных выработок Кузбасса по данным радиолокационной интерферометрии ALOS PALSAR // Исследование Земли из Космоса. – 2012. - №4. - С. 26-29.
47. Филатов А.В. Применение многовременной радиолокационной съемки ALOS PALSAR для обнаружения смещений земной поверхности в условиях Арктики [Электронный ресурс] // Журнал радиоэлектроники. - 2016. - №2. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/alt/feb16/9/text.html>.
48. Мусихин В.В., Лысков И.А. Применение радарной интерферометрии для определения деформаций трубопроводных систем в условиях тундры // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. - 2012. - №4. - С. 103-110.
49. Евтюшкин А.В., Филатов А.В. Технология построения цифровых моделей рельефа местности и оценки смещений методом радарной

интерферометрии // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. - 2009. - Т. 7. - № 1. - С. 66-72.

50. Указания по методам гидрогеомеханического обоснования оптимальных параметров гидроотвалов и отвалов на слабых основаниях. Часть I. Изучение гидрогеомеханических условий строительства, эксплуатации и рекультивации отвальных сооружений / Кутепов Ю.И., Норватов Ю.А., Кутепова Н.А. – Л.: 1989. - 56 с.

51. Мельников Н.В. Краткий справочник по открытым горным работам. – М.: Изд-во «Недра», 1968. – 308 с.

52. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах: [утв. Госгортехнадзором РФ 16 марта 1998г.] – СПб: ВНИМИ, 1998. – 208 с.

53. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология месторождений твердых полезных ископаемых. – Инж. геология, 1981, №2, с. 3-16.

54. Тарасов П.И., Фурин В.О., Ворошилов А.Г., Лобанов С.В., Неволин В.М. Конструктивные схемы гусеничных самосвалов для работы на повышенных уклонах // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2007. - № 1. - С. 336-343.

55. Методические указания по расчету устойчивости и несущей способности отвалов. – Л.: 1987. – 126 с. (М-во угольной пром-ти СССР. Всесоюзн. Ордена Трудового Красного Знамени науч.-исслед. ин-т горн. геомех. и маркшейд. дела).

56. Постановление Правительства РФ от 02.11.2013 N 986 «О классификации гидротехнических сооружений» [Электронный ресурс] // СПС КонсультантПлюс. – 2018. - Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_154080/

57. Комплект карт ОСР-2016 территории Российской Федерации. Масштаб: 1:8000000. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах. / Уломов В.И., Богданов М.И. – 2016.

58. СП 14.13330.2014. Свод правил. Строительство в сейсмических районах. СНиП II-7-81* (утв. Приказом Минстроя России от 18.02.2014 N 60/пр) (ред. от 23.11.2015) [Электронный ресурс] // СС «Техэксперт». - 2018. - Режим доступа: docs.cntd.ru/document/1200111003.

59. Мильков Ф.Н. Общее землеведение: учеб. для студ. географ. спец. Вузов. – М.: Высш. шк., 1990. – 335 с.: ил.

60. Хандожко Л. А. Экономическая метеорология. Учебник. - СПб.: Гидрометеиздат, 2005.

61. Зеленцов В.А., Павлов А.Н. Многокритериальный анализ влияния отдельных элементов на работоспособность сложной системы // Информационно-управляющие системы, 2010, №6. С. 7-12.

62. ПАО «ФосАгро» [Электронный ресурс]. – 2018. - Режим доступа: <https://www.phosagro.ru/>

63. Техничко-экономическое обоснование постоянных кондиций для подсчета запасов апатит-нефелиновых руд месторождения Плато Расвумчорр:

отчет по договору № 3001-318 / Н.В. Черевко. – Санкт-Петербург: ОАО Институт по проектированию горнорудных предприятий «Гипроруда», 2011, том 2.

64. Рябцева К.М. Хибины. – М., «Знание», 1975. – 64 с.

65. Стрелков С. А., Евзеров В. Я., Кошечкин Б. И., Рубинраут Г. С., Афанасьев А. П., Лебедева Р. М., Каган Л. Я. История формирования рельефа и рыхлых отложений северо-восточной части Балтийского щита. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л., 1976, с. 1-164.

66. Онохин Ф.М. Особенности структуры Хибинского массива и апатито-нефелиновых месторождений. Изд-во «Наука». Ленингр. отд., Л., 1975, с. 1-106.

67. Новые Хибинские апатитовые месторождения // Под ред. Е.А. Каменева, Д.А. Минеева – М. : Недра, 1982. – 189 с.

68. Тряпицин В.М., Шабаров А.Н. Современная тектоника и геодинамика Хибин. Монография. – Кострома: Авантитул, 2007. – 146 с.

69. Разработка комплексной программы инструментально-методических работ по обеспечению безопасной отработки месторождений апатит-нефелиновых руд ОАО «Апатит» (этап 1): отчёт о НИР / Шабаров А.Н. – Санкт-Петербург: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014. – 329 с.

70. Комплексная программа инструментально-методических работ по обеспечению безопасной отработки месторождений апатит-нефелиновых руд КФ АО «Апатит». Создание, наладка и апробация опытной комплексной системы мониторинга, разработка критериев опасности по данным комплексного мониторинга: отчет о НИР / Шабаров А.Н. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2017. – 192 с.

71. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений / М-во цв. мет. СССР. Горное управление: Введ. 3.07.86. – Разработ. ВНИМИ, ВНИМИгорцветмет. – М.: Недра. 1988. – 112 с.

72. Кравцова В.И. Космические методы исследования почв: Учебное пособие для студентов вузов / В.И. Кравцова. – М.: Аспект Пресс, 2005.

73. 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, 59-67. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-59-67.

74. Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р. Использование геоинформационных технологий и данных радиолокационной съёмки для мониторинга объектов горного производства // Материалы 9-й конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2016). 2016. С. 435-439.

75. 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, 22–25 сентября 2015, г. Красноярск. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. С 197-199.

76. 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.

77. Кронберг П., Пер. с нем. В. А. Буша, под ред. В. Г. Трифонова Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии. – М.: Мир, 1988.

78. 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, 57-63.

79. 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 // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения. Сборник материалов II международной научно-практической конференции. 08-10 ноября 2017 г., Санкт-Петербург / Науч. ред. О.А. Лазебник. – СПб.: Политехника, 2017. С. 68-74.

80. Пономаренко М.Р., Таратинский Г.М. Мониторинг деформаций земной поверхности в зоне ведения горных работ в районах Заполярья по данным ALOS PALSAR // XII Всероссийская научно-практическая конференция «Новые технологии при недропользовании». Секция «Инновационные технологии в маркшейдерском деле, геодезии и кадастре». Сборник научных трудов. 2016. С. 61-62.

81. 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 «География в современном мире: вековой прогресс и новые приоритеты», посвященной 100-летию создания первого в России специального географического высшего учебного заведения – Географического института, проведенной в рамках XIV Большого географического фестиваля. – Санкт-Петербург: Свое Издательство, 2018. – с. 639-642.

82. 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 съёмки // Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Сборник научных трудов. 2017. С. 229-233.

83. Пономаренко М.Р. Методы обработки данных спутниковой радарной съемки для решения задач информационного обеспечения горного производства // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи

до внедрения Сборник материалов Международной научно-практической конференции. 2015. С. 37-38.

84. Mazzanti, P. Remote monitoring of deformation. An overview of the seven methods de-scribed in previous GINs. *Geotech. Instrum.* N. 30: 24-29 (2012).

85. Zebker, H. A., Goldstein, R. M. Topographic Mapping From Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations // *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(B5):4993-4999.

86. Li, F. and Goldstein, R. Studies of Multi-baseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radar // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Ann Arbor, 18–21 May 1987, pp. 1545–1550.

87. Gabriel, A. K., Goldstein, R. M. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B, *Int.J. Remote Sensing*, 1988, 9(5):857–872.

88. Gabriel, A. K., Goldstein, R. M. and Zebker, H. A. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry // *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(B7):9183–9191.

89. Massonnet, D. and Adragna, F. (1993), A full-scale validation of Radar Interferometry with ERS-1: the Landers earthquake, *Earth Observation Quarterly*, 41.

90. Fielding E.J., Blom R.G., Goldstein R.M. Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry // *Geophysical Research Letters*, 1998, VOL. 25, NO. 17, PAGES 3215-3218.

91. Van der Kooij, M. Land subsidence measurements at the Belridge oil fields from ERS InSAR data. // *Proc. 3rd ERS Symposium*. 1997, ESA, Florence, Italy.

92. Wright P., R. Stow, Detecting mining subsidence from space // *International Journal of Remote Sensing*, 1999. 20(6): p. 1183-1188.

93. Carnec, C., C. Delacourt. Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, near Gardanne, France // *Journal of Applied Geophysics*, 2000. 43(1): p. 43-54.

94. Wegmuller, U., et al. Monitoring of mining-induced surface deformation in the Ruhrgebiet (Germany) with SAR interferometry // *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2000. *Proceedings IGARSS 2000*.

95. Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and E. Sansosti. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sens.*, 2002, 40, 2375-2383.

96. Zhang H., Wang C., Tang Y. Subsidence monitoring in coal area using timeseries InSAR combining persistent scatterers and distributed scatterers // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015. 39. 49–55.

97. Hanssen, R.F.: *Radar Interferometry: Data interpretation and error analysis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001, 308 p.

98. 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, pp 291-299 DOI 10.1007/978-3-319-57264-2_30.

99. 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), 994-1000. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-7-994-1000.

100. Advanced Land Observing Satellite. ALOS Research and Application Project of EORC, JAXA [Электронный ресурс]. – 2018. - Режим доступа: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/palsar.htm>.

101. Sentinel Missions [Электронный ресурс]. – 2018. - Режим доступа: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>

102. Copernicus Programme [Электронный ресурс]. – 2018. - Режим доступа: <http://www.copernicus.eu/>

103. Copernicus Open Access Hub [Электронный ресурс]. – 2018. - Режим доступа: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

104. ASTER GDEM [Электронный ресурс]. – 2018. - Режим доступа: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>

105. EarthExplorer [Электронный ресурс]. – 2018. - Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

106. Sentinel Toolboxes [Электронный ресурс]. – 2018. - Режим доступа: <http://step.esa.int/main/download/>

107. Snaphu [Электронный ресурс]. – 2018. - Режим доступа: http://nova.stanford.edu/sar_group/snaphu/

108. QGIS [Электронный ресурс]. – 2018. - Режим доступа: <https://qgis.org/ru/site/>

Приложение А

Карты деформаций земной поверхности на территории карьера «Центрального» по данным ALOS PALSAR

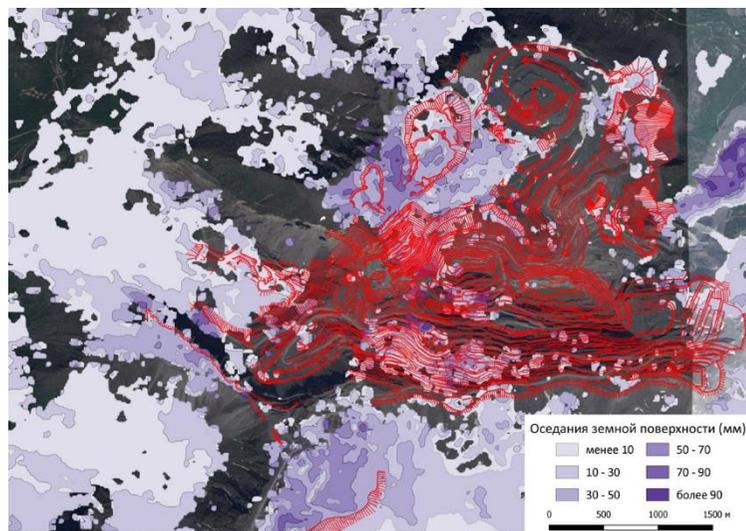


Рисунок 1 - Карта оседаний земной поверхности за период 04.09.2007-20.10.2007

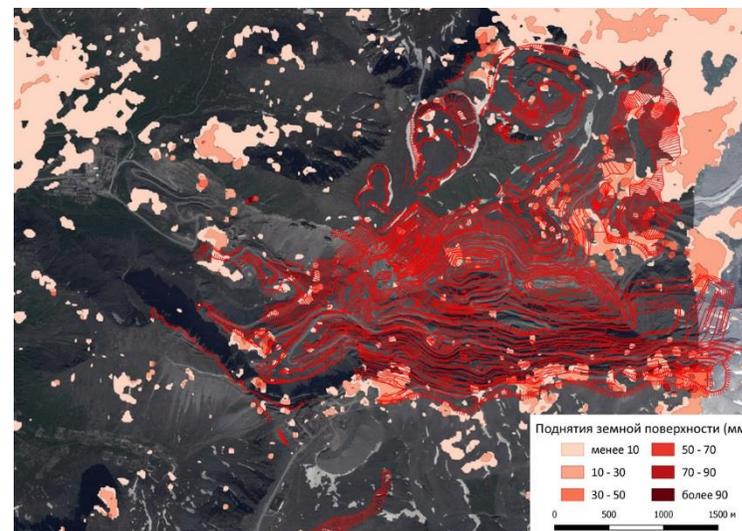


Рисунок 2 - Карта поднятий земной поверхности за период 04.09.2007-20.10.2007

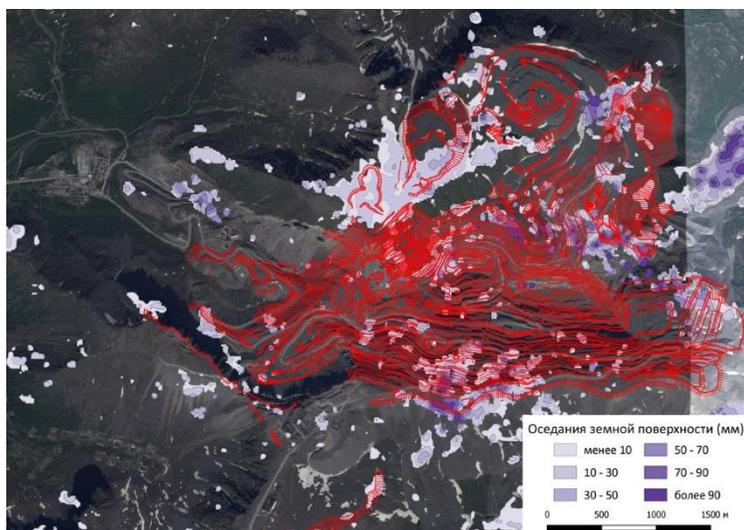


Рисунок 3 - Карта оседаний земной поверхности за период 04.09.2007-22.07.2008

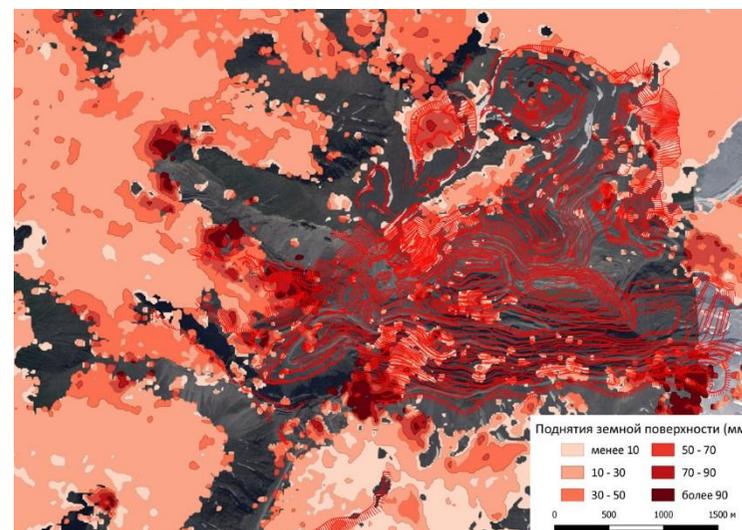


Рисунок 4 - Карта поднятий земной поверхности за период 04.09.2007-22.07.2008

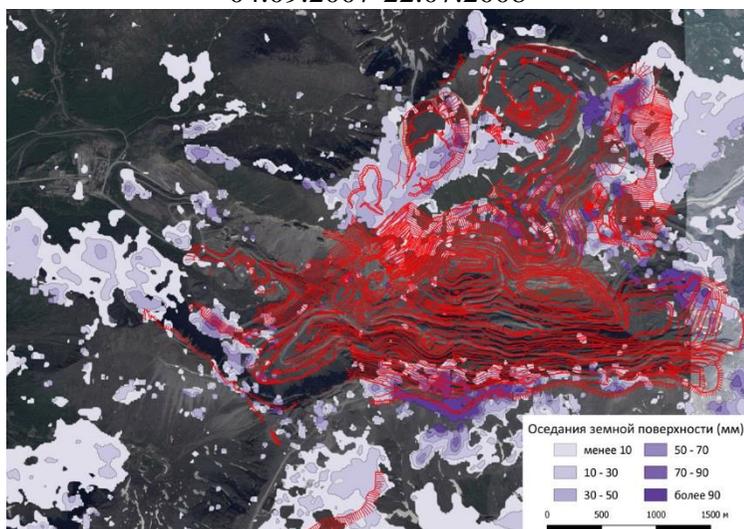


Рисунок 5 - Карта оседаний земной поверхности за период 04.09.2007-25.07.2009

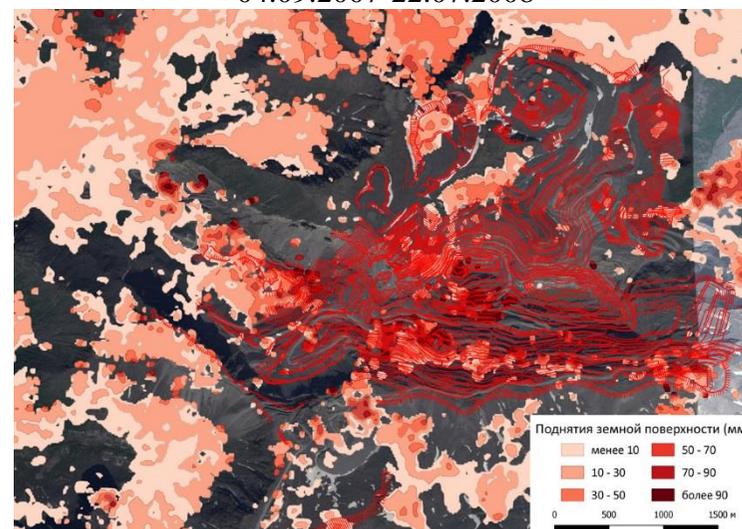


Рисунок 6 - Карта поднятий земной поверхности за период 04.09.2007-25.07.2009

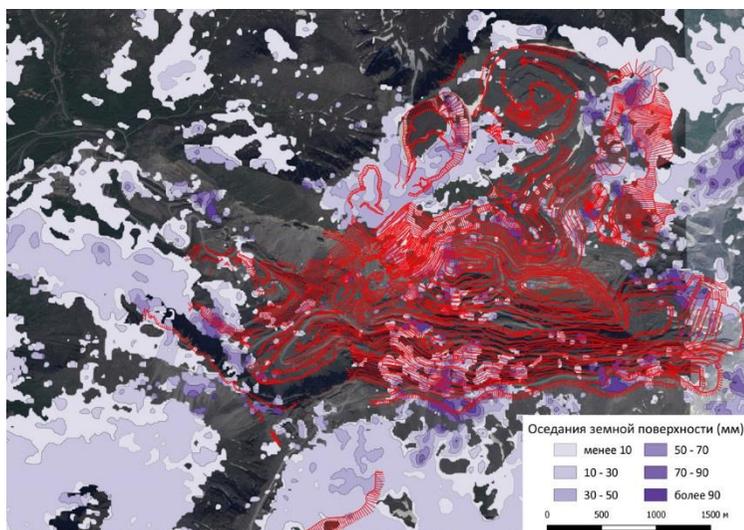


Рисунок 7 - Карта оседаний земной поверхности за период 04.09.2007-09.09.2009

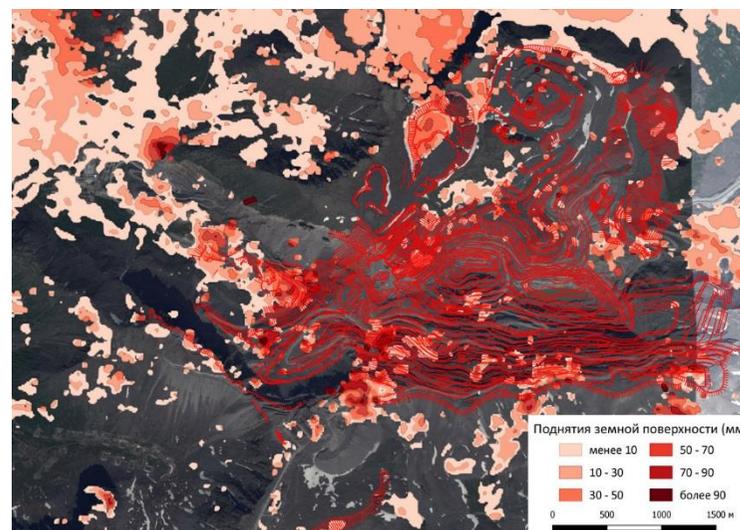


Рисунок 8 - Карта поднятий земной поверхности за период 04.09.2007-09.09.2009

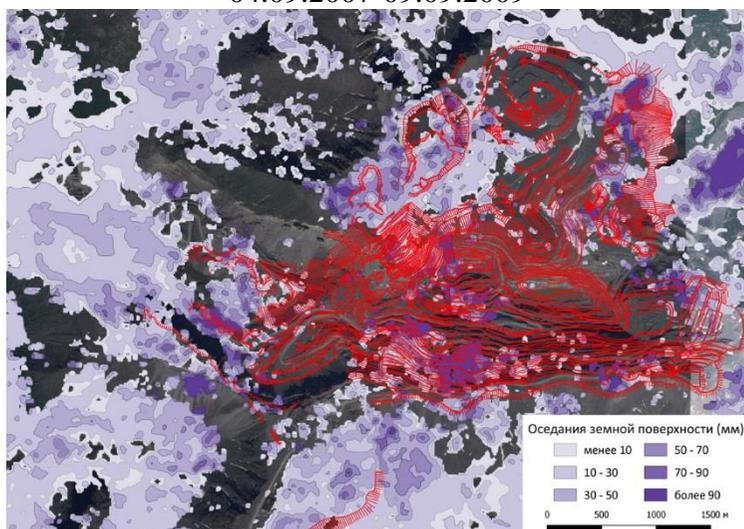


Рисунок 9 - Карта оседаний земной поверхности за период 04.09.2007-25.10.2009

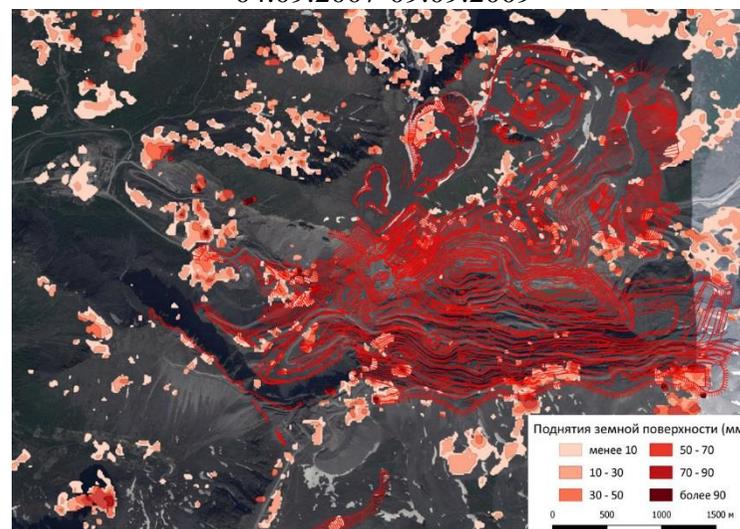


Рисунок 10 - Карта поднятий земной поверхности за период 04.09.2007-25.10.2009

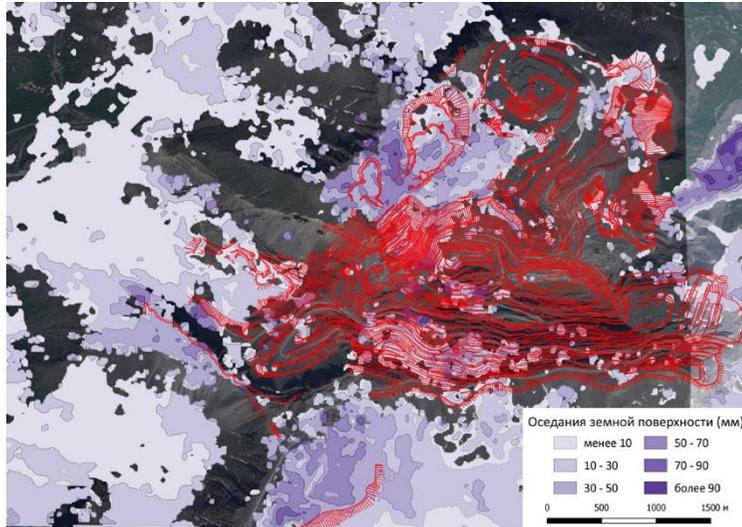


Рисунок 11 - Карта оседаний земной поверхности за период 04.09.2007-12.06.2010

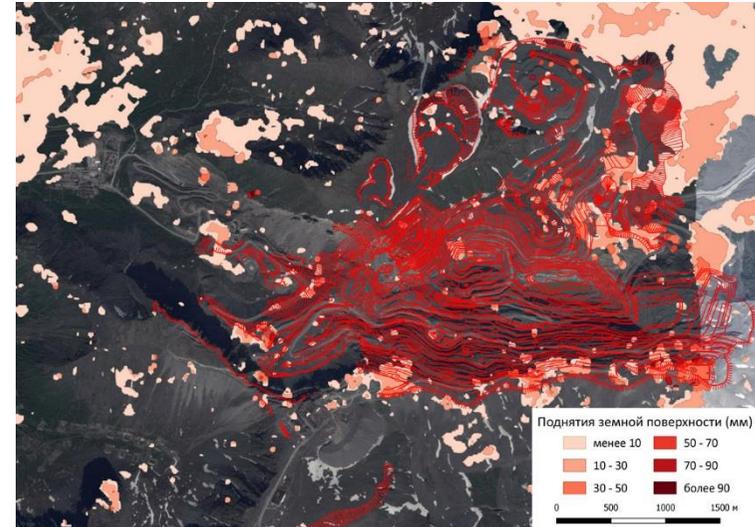


Рисунок 11 - Карта поднятий земной поверхности за период 04.09.2007-12.06.2010

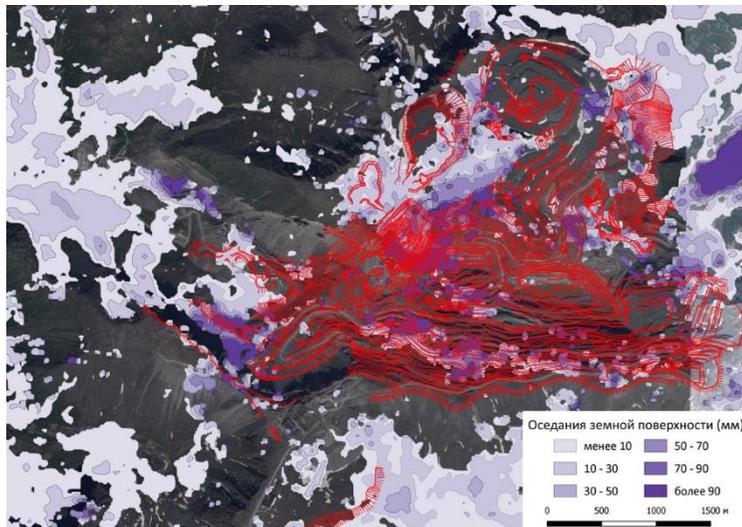


Рисунок 13 - Карта оседаний земной поверхности за период 04.09.2007-28.07.2010

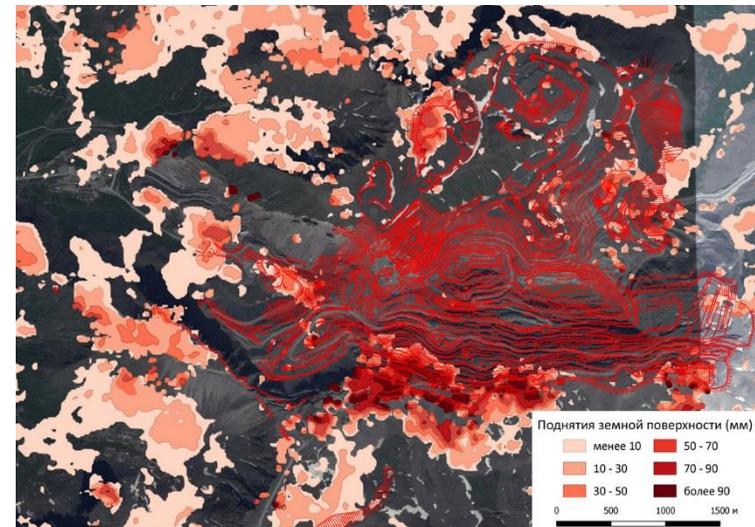


Рисунок 14 - Карта поднятий земной поверхности за период 04.09.2007-28.07.2010

Приложение Б

Карты деформаций земной поверхности на территории карьера «Центрального» по данным TerraSAR-X

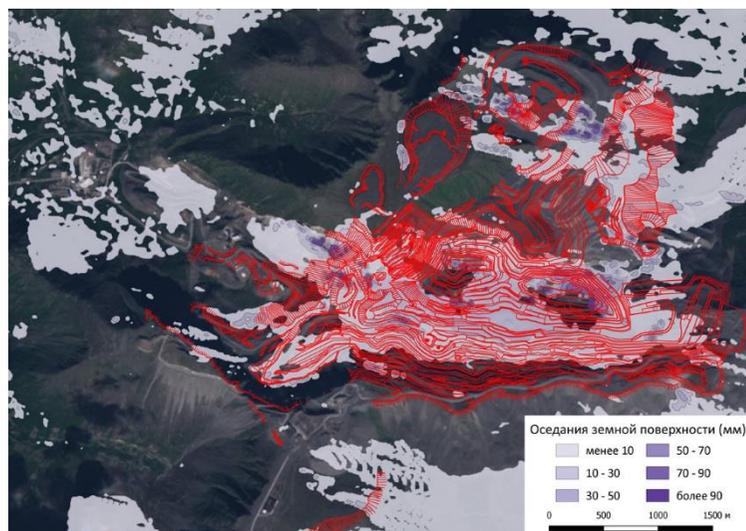


Рисунок 1 - Карта оседаний земной поверхности за период 08.07.2015-19.07.2015

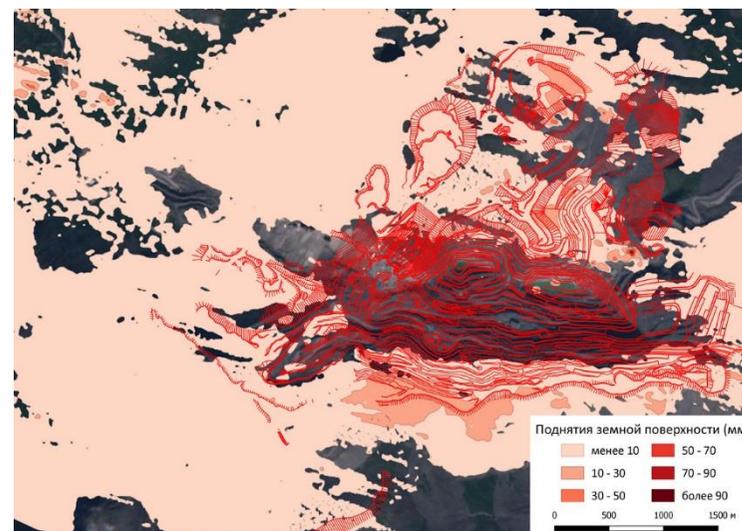


Рисунок 2 - Карта поднятий земной поверхности за период 08.07.2015-19.07.2015.

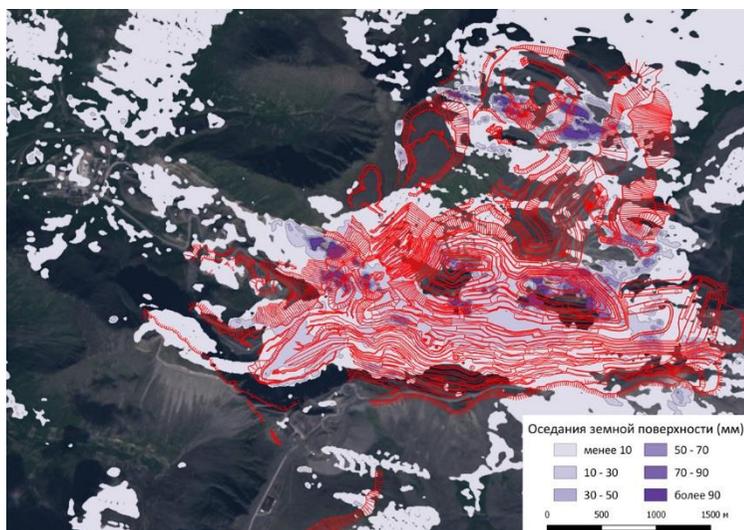


Рисунок 3 - Карта оседаний земной поверхности за период 08.07.2015-21.08.2015.

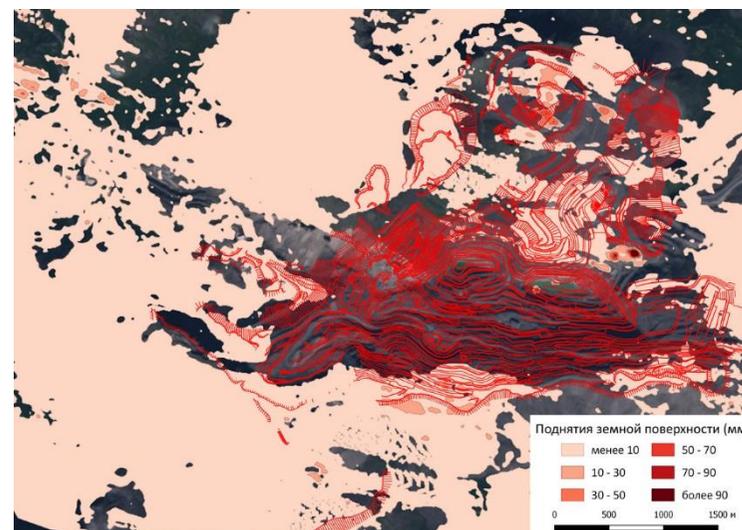


Рисунок 4 - Карта поднятий земной поверхности за период 08.07.2015-21.08.2015.

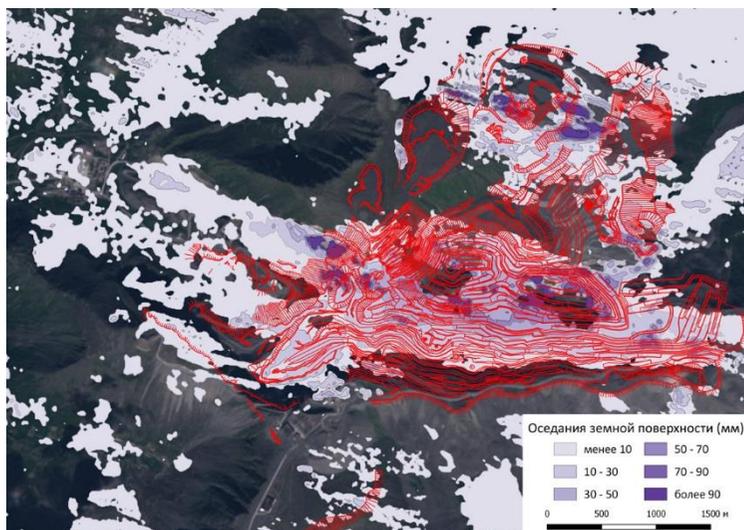


Рисунок 5 - Карта оседаний земной поверхности за период 08.07.2015-01.09.2015.

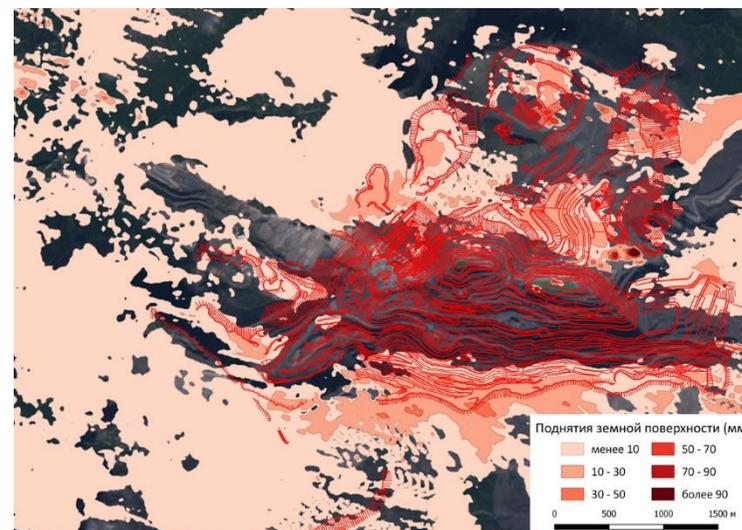


Рисунок 6 - Карта поднятий земной поверхности за период 08.07.2015-01.09.2015.

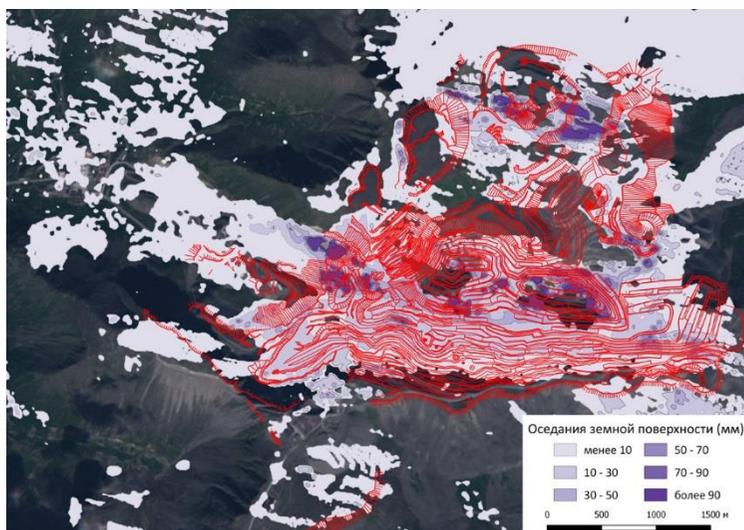


Рисунок 7 - Карта оседаний земной поверхности за период 08.07.2015-12.09.2015.

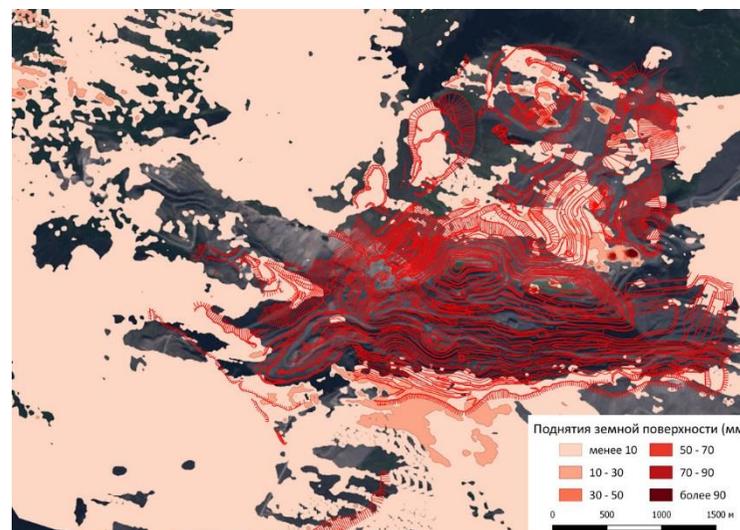


Рисунок 8 - Карта поднятий земной поверхности за период 08.07.2015-12.09.2015.

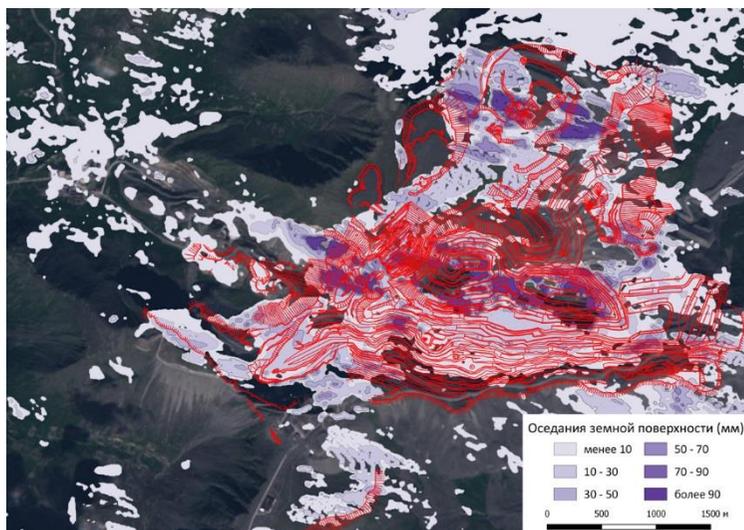


Рисунок 9 - Карта оседаний земной поверхности за период 08.07.2015-23.09.2015.

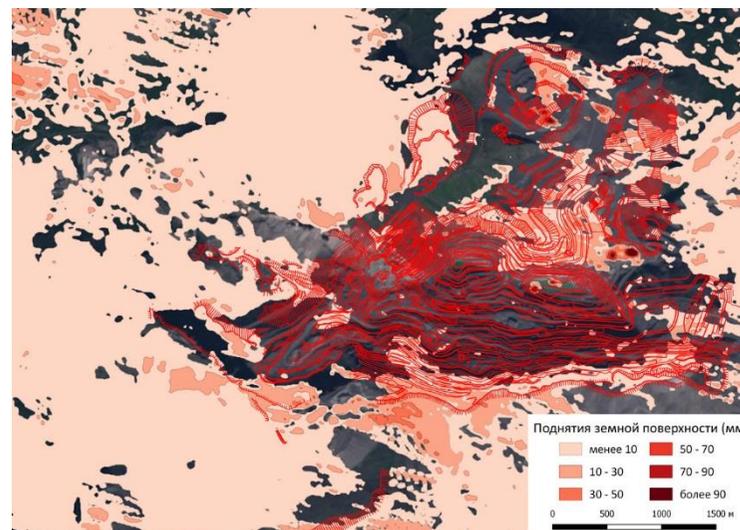


Рисунок 10 - Карта поднятий земной поверхности за период 08.07.2015-23.09.2015.

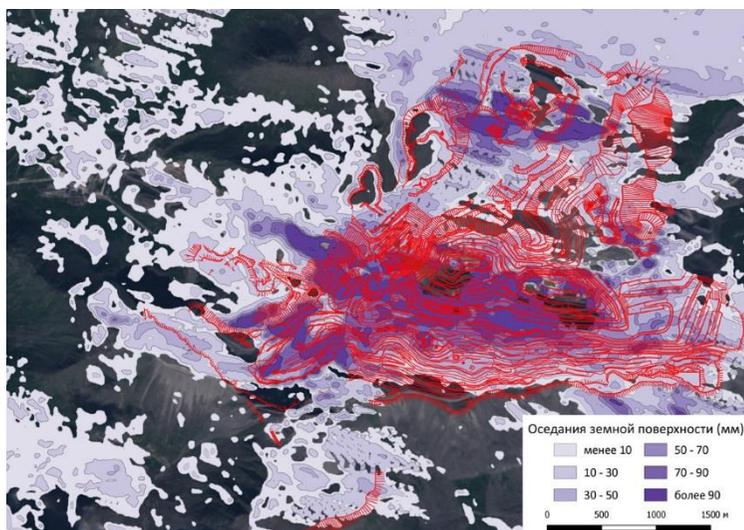


Рисунок 11 - Карта оседаний земной поверхности за период 08.07.2015-13.06.2016.

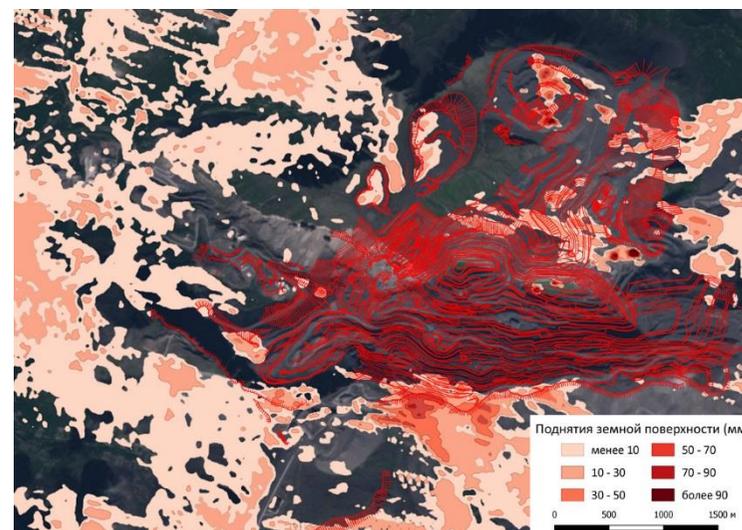


Рисунок 12 - Карта поднятий земной поверхности за период 08.07.2015-13.06.2016.

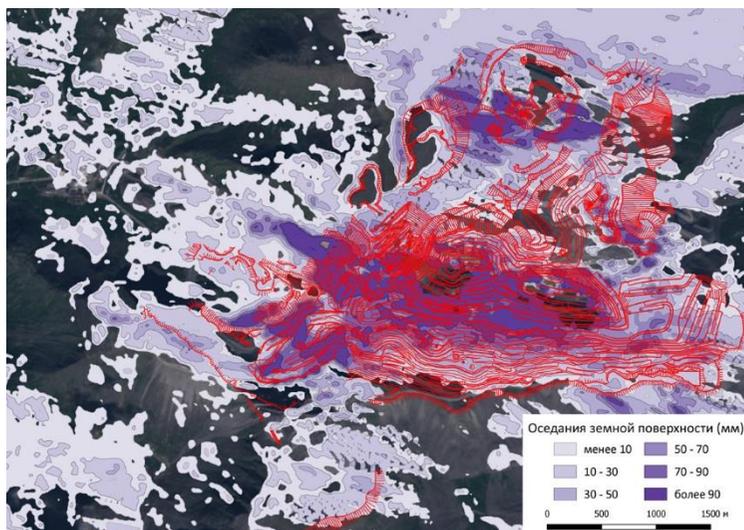


Рисунок 13 - Карта оседаний земной поверхности за период 08.07.2015-24.06.2016.

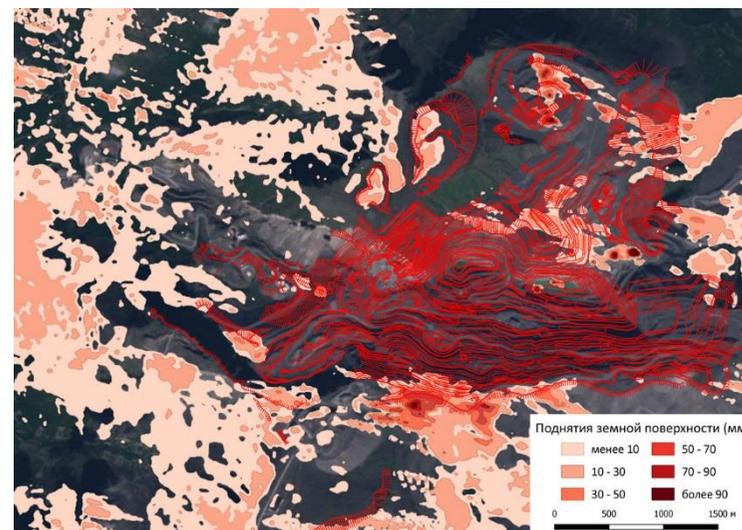


Рисунок 14 - Карта поднятий земной поверхности за период 08.07.2015-24.06.2016.

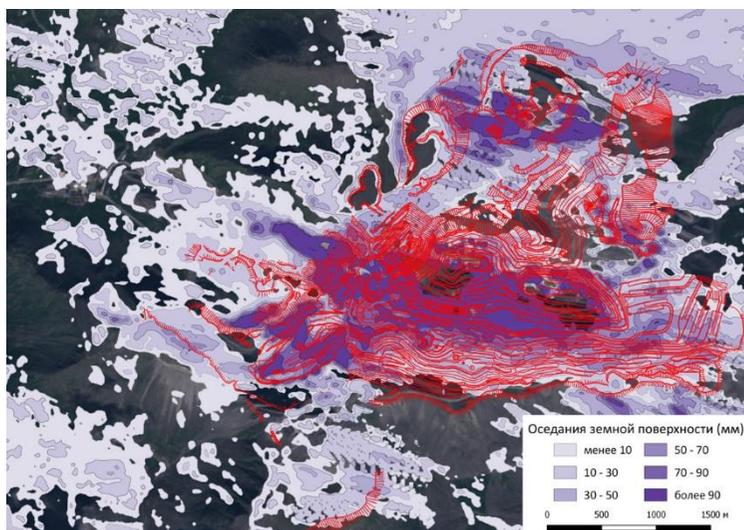


Рисунок 15 - Карта оседаний земной поверхности за период 08.07.2015-05.07.2016

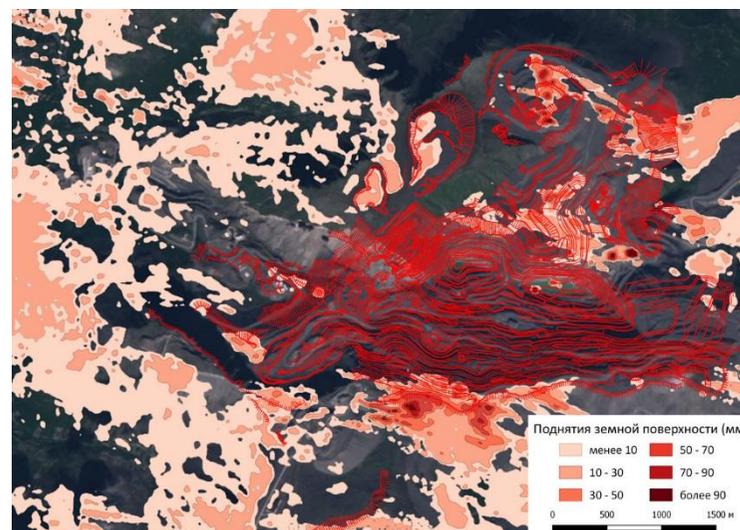


Рисунок 16 - Карта поднятий земной поверхности за период 08.07.2015-05.07.2016

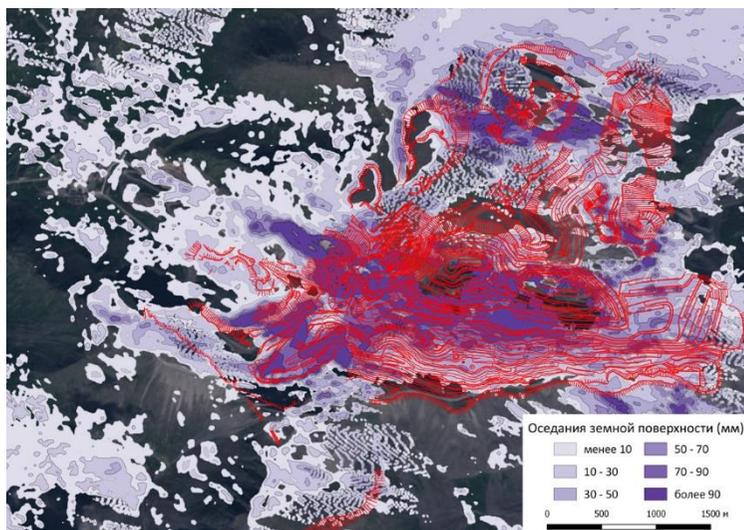


Рисунок 17 - Карта оседаний земной поверхности за период 08.07.2015-16.07.2016.

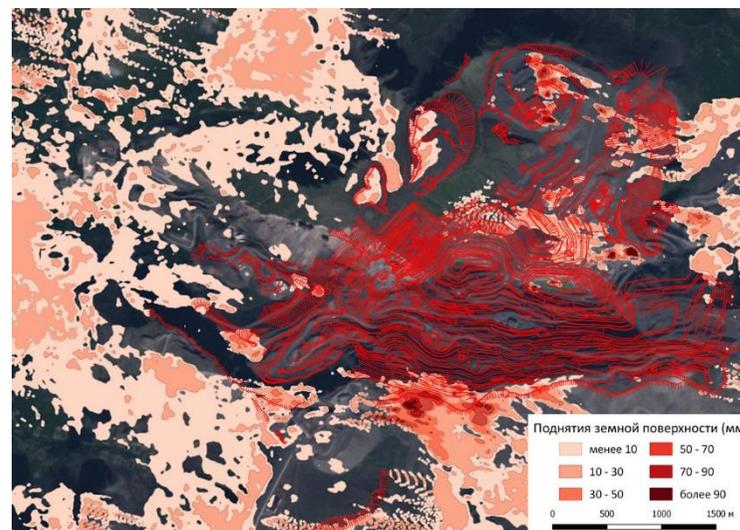


Рисунок 18 - Карта поднятий земной поверхности за период 08.07.2015-16.07.2016.

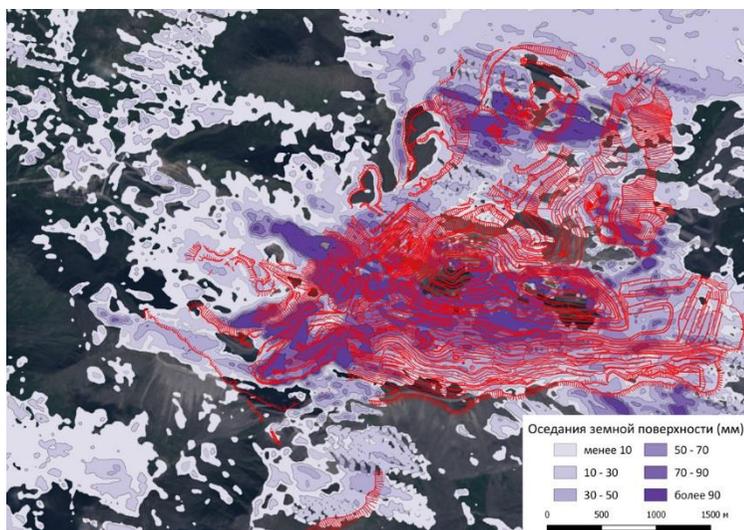


Рисунок 19 - Карта оседаний земной поверхности за период 08.07.2015-27.07.2016.

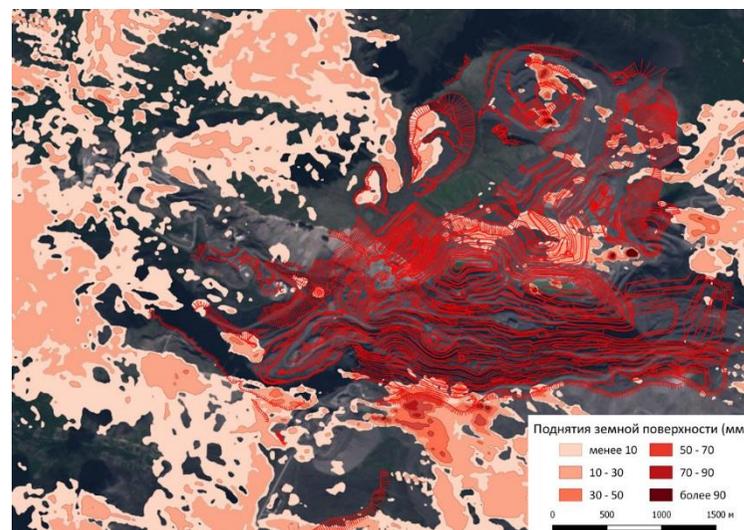


Рисунок 20 - Карта поднятий земной поверхности за период 08.07.2015-27.07.2016.

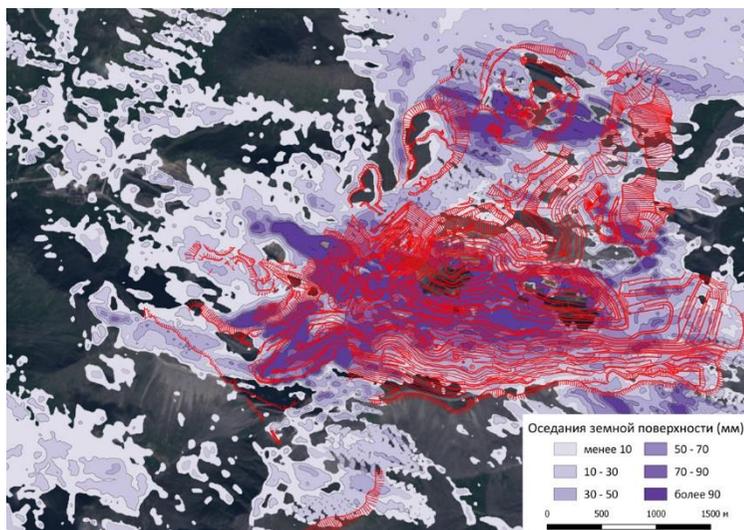


Рисунок 21 - Карта оседаний земной поверхности за период 08.07.2015-07.08.2016.

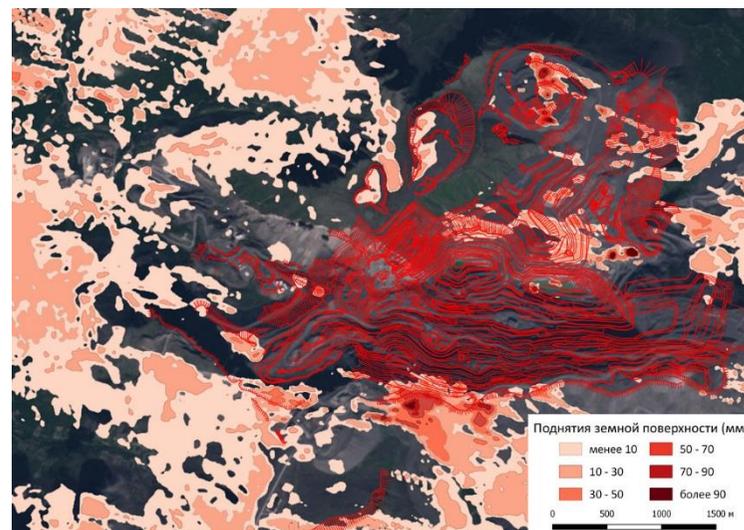


Рисунок 22 - Карта поднятий земной поверхности за период 08.07.2015-07.08.2016.

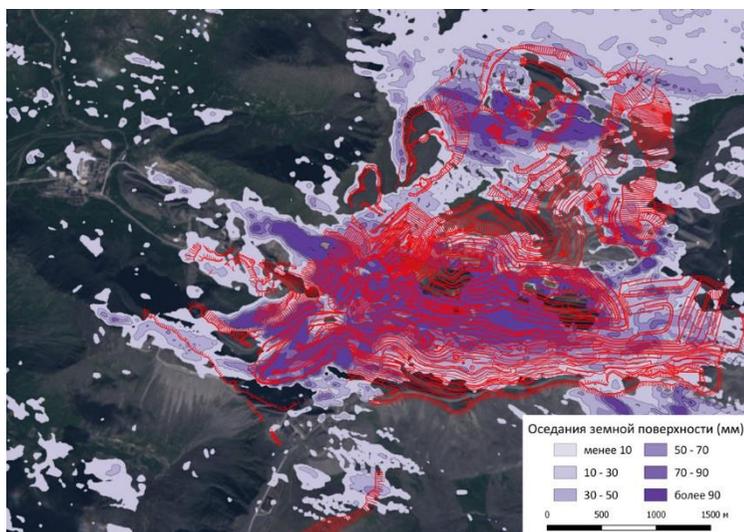


Рисунок 23 - Карта оседаний земной поверхности за период 08.07.2015-18.08.2016.

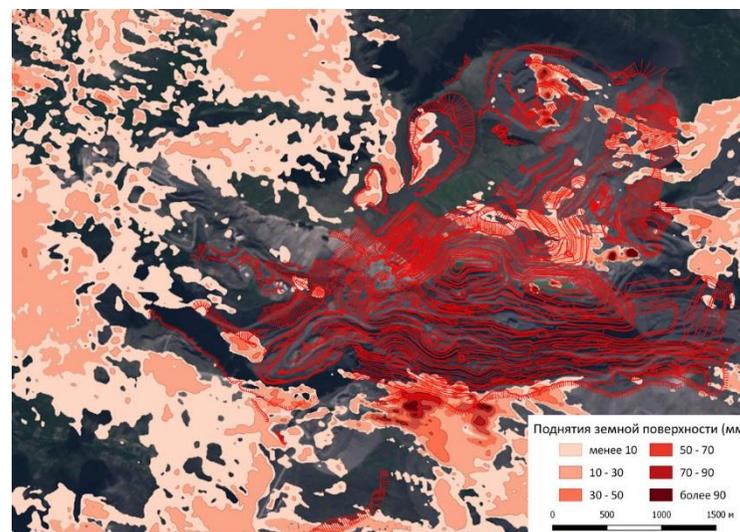


Рисунок 24 - Карта поднятий земной поверхности за период 08.07.2015-18.08.2016.

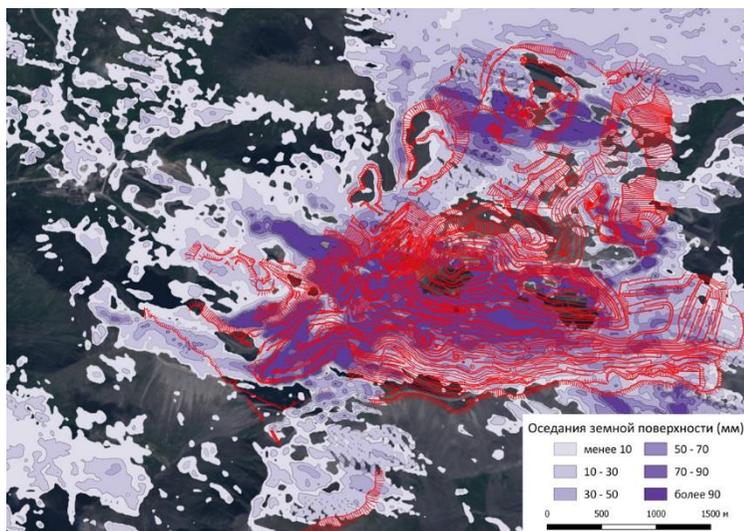


Рисунок 25 - Карта оседаний земной поверхности на территории Центрального карьера за период 08.07.2015-29.08.2016.

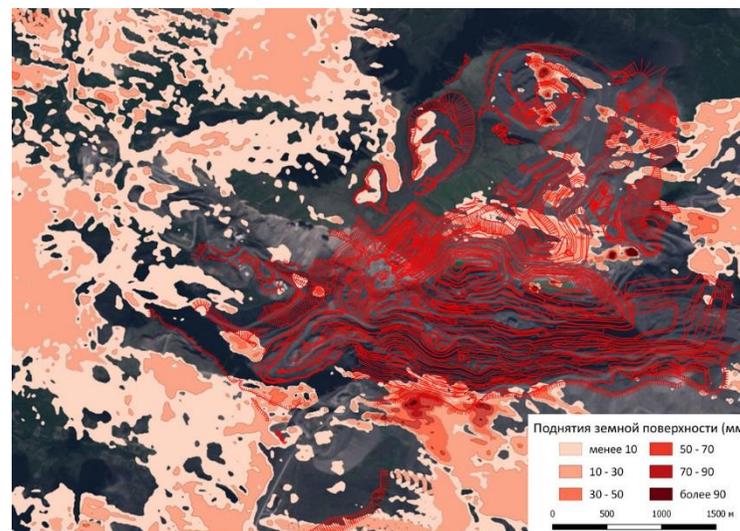


Рисунок 26 - Карта поднятий земной поверхности на территории Центрального карьера за период 08.07.2015-29.08.2016.

Приложение В

Карты деформаций земной поверхности на территории карьера «Центрального» по данным Sentinel-1

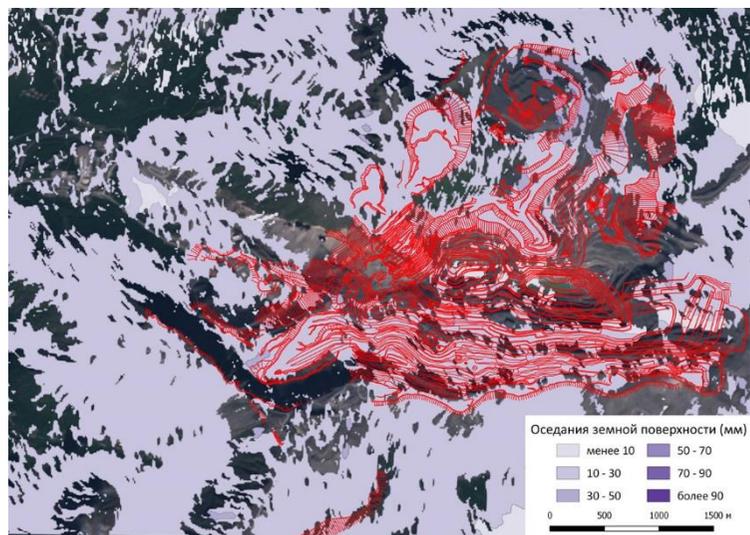


Рисунок 3 - Карта оседаний земной поверхности за период 11.08.2015-04.09.2015

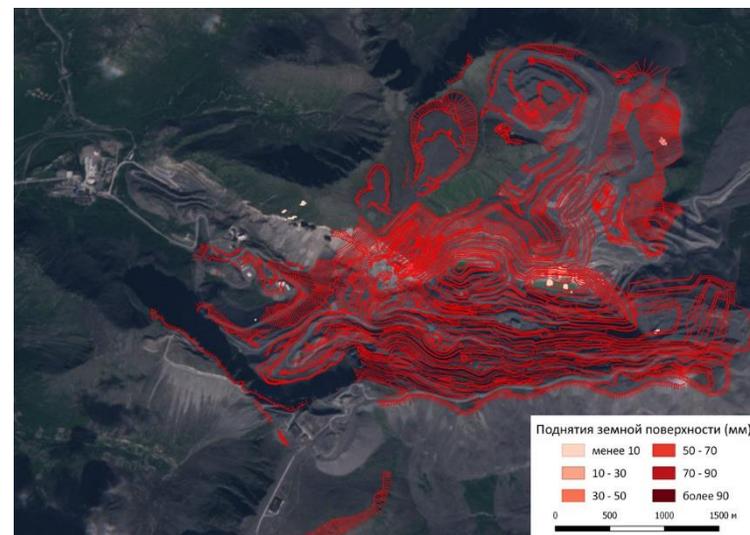


Рисунок 4 - Карта поднятий земной поверхности за период 11.08.2015-04.09.2015

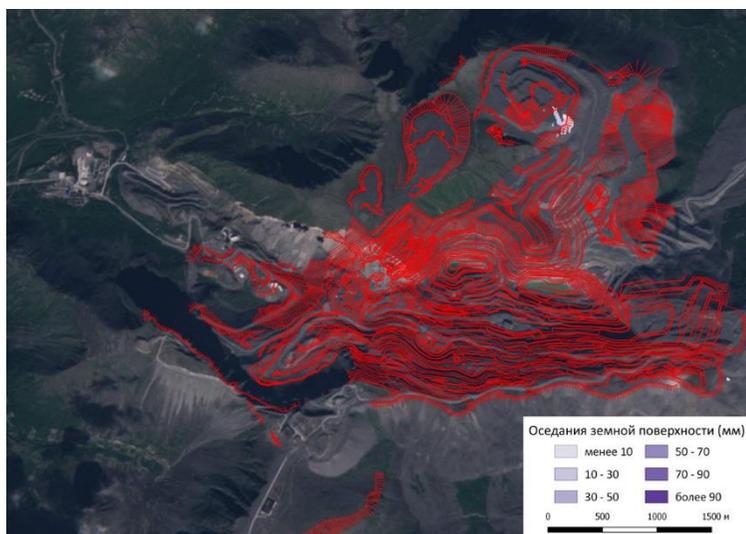


Рисунок 5 - Карта оседаний земной поверхности за период 11.08.2015-16.09.2015

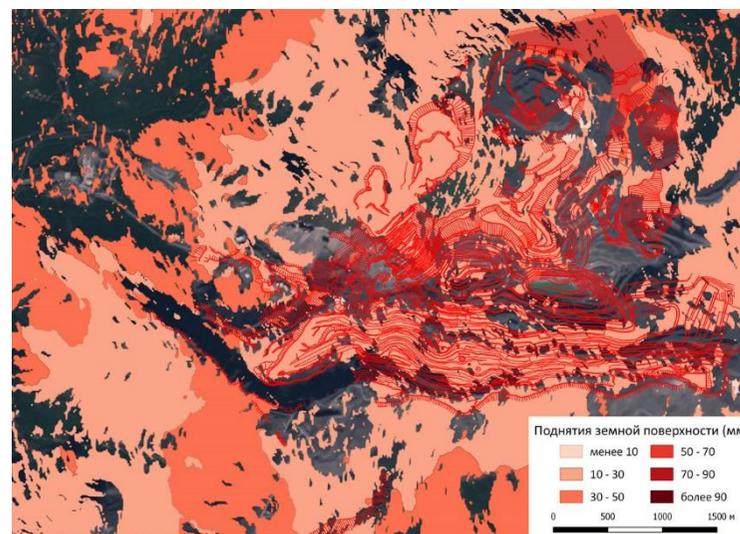


Рисунок 6 - Карта поднятий земной поверхности за период 11.08.2015-16.09.2015

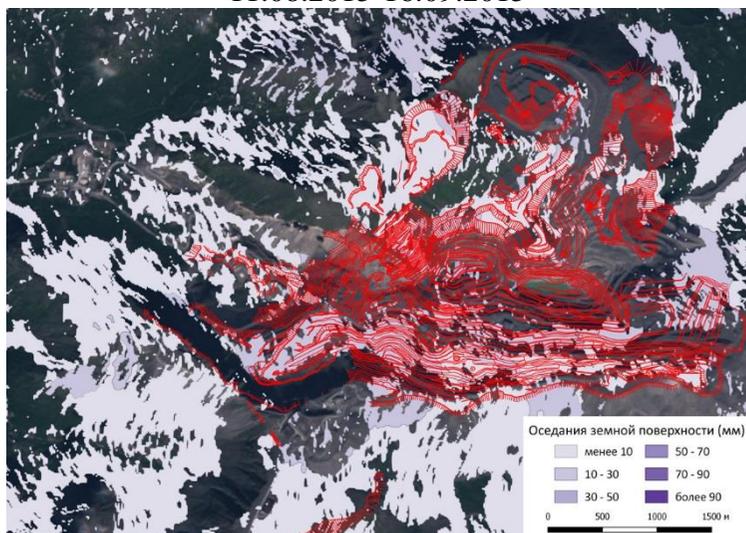


Рисунок 7 - Карта оседаний земной поверхности за период 11.08.2015-28.09.2015

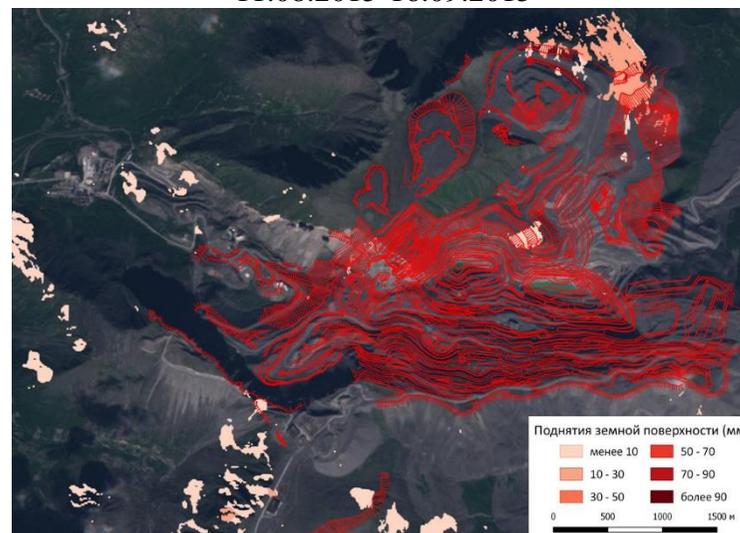


Рисунок 8 - Карта поднятий земной поверхности за период 11.08.2015-28.09.2015