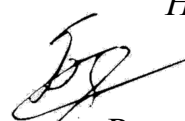


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
(ФИЦ КНЦ РАН)

ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ КНЦ РАН
(ГоИ КНЦ РАН)

На правах рукописи



Розанов Иван Юрьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБРУШЕНИЙ
МАССИВОВ ПРОЧНЫХ СКАЛЬНЫХ ПОРОД
(на примере Ковдорского месторождения апатитовых и магнетитовых руд)

Специальность 2.8.6

Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика
и горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научные руководители:

Ведущий научный сотрудник д.т.н.

Каспарьян Э.В.

Главный научный сотрудник д.т.н.

Рыбин В.В.

Апатиты 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Состояние вопроса. Обоснование цели и задачи исследования	10
1.1 Актуальность проводимых исследований	10
1.2 Мониторинг окружающей среды. Теоретические и инструментальные исследования процессов сдвижения горных пород.....	15
1.3 Существующие способы определения критических значений кинематических параметров обрушений массивов горных пород	21
1.4 Анализ условий отработки Ковдорского месторождения апатитовых и магнетитовых руд.....	26
1.4.1 Горно-геологические, геомеханические и горнотехнические условия отработки Ковдорского месторождения.....	26
1.4.2 Физико-механические свойства горных пород	30
1.4.3 Геолого-структурные особенности месторождения.....	33
1.4.4 Напряженно-деформированное состояние массива горных пород	37
1.4.5 Горнотехнические особенности отработки месторождения	40
Выводы к главе 1	43
2 Исследование закономерностей изменения кинематических параметров обрушений массивов прочных скальных пород	44
2.1 Геодезические методы сбора информации о состоянии массива горных пород	44
2.2 Анализ изменения кинематических параметров обрушений массивов прочных скальных пород.....	58
2.2.1 Изменение кинематического параметра «смещение» во времени.....	60
2.2.2 Изменение кинематического параметра «скорость смещения» во времени .	65
2.2.3 Изменение кинематического параметра «ускорение скорости смещения» во времени.....	69
Выводы к главе 2	72

3 Анализ изменения скорости смещения массива при различных видах обрушений в условиях прочных скальных пород.....	74
3.1 Виды обрушений, зафиксированные в карьере «Железный».....	75
3.2 Классификация обрушений в карьере «Железный» по кинематическому параметру скорость смещения.....	83
Выводы к главе 3	91
4 Определение критического значения кинематического параметра скорость смещения.....	93
4.1 Определение критической скорости смещения массивов прочных скальных пород.....	94
4.2 Проверка достоверности установленной критической скорости смещения массива горных пород.....	104
Выводы к главе 4	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	121
ПРИЛОЖЕНИЕ А	135

ВВЕДЕНИЕ

Разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом неизбежно сопровождается изменением геомеханического состояния вмещающего массива горных пород начиная от незначительных деформаций уступа и заканчивая существенными подвижками по границам структурных блоков, обширными оползнями и техногенными землетрясениями. Довольно часто в области влияния горных работ оказываются промышленные и жилые объекты, разрушение которых может привести к тяжелым последствиям. Стоит также отметить, что результаты техногенной деятельности оказывают воздействие на вмещающий массив, как в период эксплуатации горного предприятия, так и на протяжении длительного периода после его ликвидации.

Характерной особенностью условий разработки месторождений при открытых горных работах является достаточно высокая доля приповерхностных, большей частью слабых слоёв пород, часто по своим свойствам приближающихся к грунтовым массивам. По мере увеличения глубины карьеров доля грунтовых массивов уменьшается, а скальных, большей частью, достаточно прочных пород, увеличивается. Массивы скальных пород характеризуются ярко выраженной иерархично-блочной структурой, обусловленной широким развитием систем разномасштабных структурных неоднородностей. Кроме того, грунтовые массивы и массивы скальных пород различаются по формам проявления геомеханических процессов. Если в грунтовых массивах это в основном оползни, то в массивах скальных пород наблюдаются обрушения различных типов в масштабе одного или нескольких уступов.

Для проведения необходимых мероприятий по обеспечению устойчивости бортов и уступов карьера необходимо получать достоверную информацию об изменениях состояния массива горных пород, а также выявлять потенциально неустойчивые участки карьера. Эту информацию невозможно получать без организации системы геомеханического мониторинга состояния массива горных пород.

Геомеханический мониторинг состояния массива сводится к наблюдению за геомеханическим состоянием объекта и прогнозированию момента перехода его в предельное состояние. Последнее невозможно без определения критических значений кинематических параметров обрушений, таких как смещение или их производных (скорости и ускорения).

Существует несколько способов определения критических значений смещений и скоростей, например, путем выявления эмпирических закономерностей, полученных при анализе результатов полевых наблюдений за обрушениями или моделирования деформационных процессов различными методами.

На сегодняшний день особенно актуальным остается вопрос определения критических параметров деформирования массивов прочных скальных пород, характерных для условий месторождений, расположенных на северо-западе Российской Федерации и, в частности, Ковдорское месторождение.

Цель работы: установить закономерности развития процесса деформирования и разрушения и определить критические значения кинематических параметров обрушений массивов прочных скальных пород.

Идея работы состоит в обосновании кинематических параметров подготовки обрушения элементов конструкции борта карьера на основе исследования особенностей протекания процесса разрушения массива прочных скальных пород по результатам наземного радарного мониторинга.

Задачи исследования:

1 Проанализировать информацию о системах мониторинга геомеханического состояния массива горных пород и существующих способах определения критических значений кинематических параметров.

2 Определить актуальные кинематические параметры разрушения, подходящие для прогноза обрушений в условиях массивов прочных скальных пород.

3 Выявить закономерности развития процесса разрушения массива прочных скальных пород по кинематическим характеристикам.

4 Установить критические значения кинематических параметров разрушения массива прочных скальных пород.

Методы исследований. В работе применён комплексный метод исследований, включающий анализ и обобщение научного и практического опыта по проблеме; современные технологии для проведения геодезического мониторинга; анализ существующих способов определения критических значений кинематических параметров обрушений массивов горных пород; натурные измерения смещений и скорости смещений методом наземного радарного мониторинга.

Научная новизна работы заключается:

1 Установлено, что критической скоростью смещения массива в карьере «Железный» для обрушений в скальных массивах горных пород является скорость смещения 2 мм/ч.

2 Выявлено, что все зафиксированные случаи обрушений в карьере «Железный» можно разделить на 3 группы по характеру развития процесса разрушения. Каждая выделенная группа характеризуется типичными графиками нарастания скорости смещения массива, а также временем реализации обрушения.

3 Анализ данных радарной системы мониторинга об обрушениях показал, что кинематический параметр «скорость смещения» является наиболее подходящим для оценки состояния массива горных пород и прогноза вероятного обрушения, т.к. графики скорости склонны к достаточно плавному нарастанию и падению, а обрушение происходит при ярко выраженном максимальном значении.

Практическая значимость работы

1 Определено критическое значение параметра «скорости смещения» актуальное для массивов прочных скальных пород.

2 Разработана классификация обрушений в карьере «Железный» по кинематическому параметру «скорость смещения».

3 Разработана «Временная инструкция по наблюдению за деформациями бортов и откосов уступов карьера с помощью радара IBIS FM».

4 Разработана «Инструкция по выявлению неустойчивых участков борта карьера с помощью наземных радаров для работников диспетчерской службы карьера «Железный» Акционерного общества (АО) «Ковдорский ГОК».

Реализация результатов работы. Результаты исследований реализованы в ходе выполнения хоз. договорных работ, проводимых Горным институтом КНЦ РАН в карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК» и в отчетах НИР Горного института КНЦ РАН.

Научные положения, выносимые на защиту:

1 Кинематический параметр «скорость смещения» является наиболее информативным для оценки состояния массива горных пород и прогноза вероятного обрушения, т.к. графики зависимости скорости смещения от времени склонны к достаточно плавному нарастанию и падению, а обрушения происходят при её ярко выраженном максимальном значении.

2 Зафиксированные обрушения в карьере «Железный» можно разделить на 3 группы по характеру развития процесса разрушения: оползни-обрушения, обрушения в скальных сильно трещиноватых массивах и обрушения в скальных мало трещиноватых массивах. Каждая выделенная группа характеризуется типичными графиками нарастания скорости смещения массива, а также временем реализации обрушения.

3 Для условий массивов прочных скальных пород скорость смещения 2 мм/ч является критической для реализации обрушения вне зависимости от той кинематической группы, к которой относится обрушение.

Достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждена опытом безопасного ведения горных работ, результатами многолетних натурных измерений, проводимых в карьере «Железный», сходимостью результатов прогноза состояния массива по данным наземного радарного сканирования с зафиксированными фактами потери устойчивости участков борта.

Апробация работы. Результаты исследований и основные положения работы докладывались на II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Глубокие карьеры» (Апатиты, 2015), X международной школе-семинаре «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» и VI российско-китайском научно-техническом форуме «Проблемы нелинейной геомеханики на больших глубинах» (Апатиты, 2016); XXV Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2017» (Москва, 2017); XV международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2019); V Международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах» (Москва, 2019), VIII Международной научной конференции «Проблемы комплексного освоения георесурсов», г. Хабаровск, 8-10 сентября 2020 г., Всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов «Цифровые технологии в горном деле» (Апатиты, 2021), были изложены в научно-исследовательских отчетах Горного института КНЦ РАН и опубликованы в научных статьях.

Личный вклад:

- 1 Собраны и проанализированы данные радарной системы мониторинга об обрушениях, происходящих в карьере «Железный».
- 2 Выполнена группировка зафиксированных обрушений по кинематическому параметру «скорость смещения» и времени реализации обрушения.
- 3 Выявлена критическая скорость смещения массива для обрушений в скальных массивах горных пород.
- 4 Разработаны 2 инструкции: «Временная инструкция по наблюдению за деформациями бортов и откосов уступов карьера с помощью радара IBIS FM», «Инструкция по выявлению неустойчивых участков борта карьера с помощью наземных радаров для работников диспетчерской службы карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК».

Публикации. По результатам исследований опубликовано 15 работ (из них 7 работ - в изданиях, рекомендованных ВАК).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 135 страницах машинописного текста, в том числе: 67 рисунков, 5 таблиц, список литературы из 110 наименований и 1 приложения.

Автор выражает искреннюю признательность своим научным руководителям - доктору технических наук Каспарьяну Э.В. и доктору технических наук Рыбину В.В. за помощь в постановке проблемы и руководство исследованиями. Автор благодарен сотрудникам лаборатории геомеханики и института за плодотворное сотрудничество, а также сотрудникам Геомеханической службы АО «Ковдорский ГОК» в целом, начальнику службы Завьялову А.А. и маркшейдеру службы Коржанкову Р.Б. в частности за помощь в сборе информации об обрушениях и обсуждении результатов исследования.

1 Состояние вопроса. Обоснование цели и задачи исследования

1.1 Актуальность проводимых исследований

В последние годы, как в зарубежной, так и в отечественной практике наблюдается тенденция к расширению масштабов разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом, в частности, увеличения глубины открытых горных работ. Глубина карьера «Bingham-Canyon» в США достигает 1200 метров, а карьер «Chuquibambilla» в Чили 850 метров. В России самыми глубокими карьерами являются: Сибайский карьер (600 метров), Удачный (640 метров), карьер Лебединского ГОКа (600 метров).

Перемещение значительной массы горных пород при разработке месторождения приводит к изменению напряженно-деформированного состояния, нарушению природных гидрогеологических и газовых режимов вмещающего массива и является причиной возникновения упругих и упруго-пластических деформаций и разрушений горных пород, что в свою очередь негативно сказывается на устойчивости отдельных уступов и борта карьера в целом.

Случаи потери устойчивости участка борта встречаются повсеместно как при отработке рудных, так и угольных месторождений. Самое крупное обрушение участка борта произошло в карьере «Bingham-Canyon» 11 апреля 2013 г. Объем обрушения пород составил более 55 млн. м³. При этом было завалено 2/3 рабочего пространства на дне карьера, засыпаны 14 самосвалов, разрушено несколько зданий и сооружений. Ущерб оценивается в 1 миллиард долларов [1].

К сожалению, в открытых источниках нет информации о причинах этого обрушения и свойствах горных пород, однако из комментариев сотрудников компании Rio Tinto-Kennecott стало известно, что на северо-западном участке произошел оползень в масштабе борта карьера. Необходимо отметить, что с помощью системы мониторинга удалось зафиксировать первые смещения еще в начале февраля. Скорость смещений составляла 1 мм/сутки. Постепенно скорость

увеличилась и к 10 апреля достигла 5 см/сутки. Из карьера вывели всех рабочих и технику, а местных жителей предупредили о возможном инциденте. Вечером того же дня произошло обрушение [2].

08 июля 2002 г произошло обрушение на карьере рудника «Кумтор» в Киргизии. Обрушение началось с выброса породы на участке длиной около 100 м, расположенном на 70-80 м выше основного обрушения. Следом за выбросом наблюдалось сотрясение поверхности борта и обрушение скального массива. Весь процесс длился не более 10 сек. Обрушение в верхней части произошло по крутопадающему разлому. Объем обрушившейся массы составил 2,7 млн. м³[3].

За 30–40 лет строительства и эксплуатации железорудных карьеров Кривбасса (Украина) отмечено более 500 случаев оползневых явлений, которые причинили ощутимый вред производству.

Один из крупнейших оползней в практике открытых горных работ отмечен на карьере № 3 месторождения Меловое (Казахстан) при высоте борта 110 м и угле наклона 22 градуса (1987 г.). Длина зоны деформаций достигла 950 м, объем перемещенных пород – 25 млн. м³ [4, 5].

За время функционирования карьера Мурунтау (Узбекистан) (с 1967 г.) зафиксировано 54 случая различных деформаций. В общем количестве зарегистрированных деформаций в глубоком карьере объемы нарушенных пород варьируют в пределах от 900 м³ до 230 000 м³, при этом оползни составляют 18,5%, обрушения – 81,5%. Длина всех разрушающих деформаций по фронту превышает высоту деформированного уступа в 2 – 5 раз [4].

В июне 1988 года произошло обрушение на северо-западном участке борта карьера Оленегорского рудника (горизонт (гор.) +74÷-40 м.) объемом 30 000 м³. Участок, на котором произошло обрушение пород, был расположен на висячем боку залежи и сложен трещиноватыми гнейсами, которые секутся двумя взаимопересекающимися жилами пегматитов. Простираание одной из них 290-310°, угол падения 80-90°, мощность - 0,5-1 м. Элементы залегания второй дайки согласны с элементами залегания сланцеватости гнейсов: простираание 130-140°, падение ЮЗ 50-65°, мощность до 2 м. На всем участке сползания наблюдались

частые маломощные жилы пегматитов и зоны дробления, согласные с напластованием гнейсов. В северной части участка борт пересекался дайкой диабазы мощностью 3-4 м, простирание 110° , падение ЮВ $60-75^\circ$, лишь в откосе уступа $+50 \div +20$ м выполаживающейся до $35-40^\circ$. На контакте дайки с гнейсами были развиты зоны дробления мощностью 0,5-1 м, по которым происходит разгрузка подземных вод в карьер [6].

На участке сползания преобладало две системы трещин:

1. простирание $300-320^\circ$, падение СВ $50-80^\circ$;
2. простирание $40-60^\circ$, падение 90° .

Причиной аварии стало несоответствие принятых в проекте и реализованных углов погашения откосов фактическим горно-геологическим условиям в местах тектонических нарушений, выявленных в процессе отработки участка.

В августе 1999 г. в Коашвинском карьере Восточного рудника АО «Апатит» из-за обильных водопритокков произошла потеря устойчивости моренных грунтов восточного борта карьера в виде оползня общим объемом $75\,000\text{ м}^3$. Параметры уступов до обрушения были следующими: на горизонтах $+260 \div +230$ высота уступа составляла 30 метров, угол откоса 49° , ширина бермы 70 метров; на горизонтах $+270 \div +260$ высота уступа 10 метров, угол откоса 49° . Срок службы уступов до обрушения составлял около 2 лет [7].

Основная стадия обрушения продолжалась месяц. После завершения процесса разрушения размеры оползня составили: длина по фронту – 85 м, средняя глубина развития – 45 м, а максимальная достигла 85 м, средняя величина смещения 300 м при максимальной – 750 м [7].

01 июня 2010 г. на восточном участке борта карьера рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» (гор. $+118 \div +40$) произошло обрушение. По данным Службы мониторинга устойчивости уступов Геологического управления АО «Ковдорский ГОК» (СМУУ ГУ) время активной стадии обрушения продолжалось около 9 часов, объем обрушения составил $40\,000\text{ м}^3$.

Участок борта, на котором развивалась деформация, сложен пироксенитами и ийолитами. Горный массив в пределах участка пронизан мелкими жилами и прожилками карбонатитов. Большинство структур ориентировано в двух системах: радиальной, с углами падения $\sim 75^\circ$ и центриклинальной, с углами падения $\sim 50^\circ$.

Сотрудниками СМУУ ГУ был составлен паспорт обрушения №11, в котором указано, что в 10:20 произошла деформация группы уступов в восточном борту карьера. В результате сдвижения горной массы призмы обрушения по плоскости ослабления, ориентированной субпараллельно поверхности откоса уступа гор. +142÷+118 - произошла просадка участка бермы гор.+118 в восточном борту карьера длиной ~ 85 м. Величина просадки визуальнo была оценена в 6-8 м (25-30% от высоты уступа), что подтверждается данными фотосъемки. Нижняя часть призмы обрушения внедрилась на 7-8 м в технологическую насыпь, расположенную под деформацией на берме гор.+40. После резкого сдвига в течение 8 часов продолжалась активная фаза обрушения, сопровождавшаяся регулярными вывалами горной массы из тела призмы обрушения ($5-10 \text{ м}^3$, иногда $20-30 \text{ м}^3$).

24 августа 2015 на восточном участке борта карьера рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» (гор.+70÷-35) произошло обрушение объемом около $180\,000 \text{ м}^3$ [8, 9].

По данным СМУУ ГУ АО «Ковдорский ГОК» участок борта, на котором развивается деформация, сложен пироксенитами и ийолитами. Пироксениты темно-серые, зеленовато-серые, мелко-, среднезернистые, трещиноватые, ослюденелые. Ийолиты серые, темно-серые, мелко-, среднезернистые, трещиноватые, ослюденелые. Горный массив в пределах участка пронизан мелкими жилами и прожилками карбонатитов, часто выветрелыми с оторочкой слюдита. Так же участок пересекает дайка карбонатитов. Карбонатиты лейкократовые, среднезернистые, с вкраплениями темнокветных минералов, малотрещиноватые. Большинство структур в пределах участка ориентировано в

двух системах: радиальной, с углами падения $\sim 75^\circ$ и центриклинальной, с углами падения $\sim 50^\circ$.

Данный участок обрушения ограничен двумя разрывными структурами: с юга – азимут падения 170° угол 72° , который меняется с гор. $+10\text{м} \div +40\text{м}$ на аз. пад. 226° угол 75° , с севера – аз. пад. 215° угол 61° . А также призма обрушения была подсечена плоскостью № 62: средний угол падения 54° , аз. пад. изменяется от 280° в южной части участка до $285\text{--}290^\circ$ в северной. Причины обрушения: несоответствие параметров уступа физико-механическим и инженерно-геологическим характеристикам массива в пределах данного участка борта.

Потеря устойчивости участков борта влечёт за собой экономические потери для предприятия начиная с повреждения техники и причинения вреда здоровью работающего персонала при незначительных обрушениях в масштабе 1-2 уступов и заканчивая нарушением режима работы предприятия и даже полного его закрытия при крупных обрушениях в масштабе всего борта. Случаи потери устойчивости можно свести к минимуму путем изменения параметров отработки карьера (например, снижение генерального угла наклона борта карьера и отдельных уступов или уменьшение высоты уступов), однако зачастую подобный подход является экономически не целесообразным. Ведение открытых горных работ с применением экономически эффективных параметров возможно при условии организации системы мониторинга, которая позволит спрогнозировать вероятное обрушения по месту, масштабу и времени и позволит свести к минимуму экономические потери. Для прогноза обрушения необходимо определить критические значения кинематических параметров разрушения массива горных пород, таких как смещение, скорость и ускорение, причем для того, чтобы у персонала было время на эвакуацию из опасной зоны необходимо также установить закономерности развития процесса и установить момент, когда обрушение будет неизбежно.

1.2 Мониторинг окружающей среды. Теоретические и инструментальные исследования процессов сдвижения горных пород

Человек с незапамятных времен собирает и использует информацию об изменении состояния окружающей природной среды. Хорошим примером подобных наблюдений является различного рода метеорологические измерения. Воздействие человека на окружающую среду со временем возросло и стало очевидным, что бесконтрольное использование природных ресурсов приводит к негативным последствиям. Так возникла еще большая необходимость в получении детальной объективной информации об изменении состояния окружающей природной среды.

Термин «мониторинг» впервые появился в рекомендациях специальной комиссии СКОПЕ (Научный комитет по проблемам окружающей среды) при ЮНЕСКО в 1971 г., а в 1972 г. уже появились первые предложения по организации Глобальной системы мониторинга окружающей среды (Стокгольмская конференция ООН по окружающей среде) [10].

Существует большое количество определений этого понятия, в зависимости от того в какой области деятельности человека оно применяется. Например, в работе [11] автор определяет мониторинг как систему повторных наблюдений одного и более элементов окружающей природной среды в пространстве и времени с определенными целями в соответствии с заранее подготовленной программой, а в [12] мониторингом называют систему наблюдений, позволяющую выделить изменения состояния биосферы под влиянием человеческой деятельности.

Необходимо особо отметить вклад в развитие общей концепции мониторинга окружающей среды академика Ю.А. Израэля. Он считал, что мониторинг должен включать в себя наблюдение, оценку и прогноз состояния природной среды и не включать управление качеством окружающей среды и деятельностью человека [13].

При разработке месторождений полезных ископаемых особое значение приобретает организация системы геомеханического мониторинга как необходимого условия обеспечения безопасности производства. В развитие геомеханики в целом и геомеханического мониторинга в частности весомый вклад внесли такие отечественные ученые как Г.Л. Фисенко, С.Г. Авершин, И.М. Бахурин, А.М. Гальперин, Д.В. Жиров, О.В. Зотеев, А.В. Зубков, М.Д. Ильинов, М.А. Иофис, Д.Р. Каплунов, Э.В. Каспарьян, Ю.А. Кашников, С.В. Корнилков, А.А. Козырев, Ю.О. Кузьмин, Ю.И. Кутепов, А.В. Леонтьев, А.Б. Макаров, О.Н. Малинникова, В.Н. Опарин, А.А. Панжин, Ю.И. Рассказов, В.В. Рыбин, М.В. Рыльникова, А.Д. Сашурин, В.А. Трофимов, Ю.Л. Юнаков, а также зарубежные ученые - Х. Бок, Ф. Дайт А.А. Карлсон и др.

Достаточно детально исследования вопросов сдвижения массивов горных пород как окружающей среды для горных предприятий начали выполняться в середине 19 века. В этот период появились исследовательские работы на основе фактических наблюдений за массивом. В тоже время начались и маркшейдерские наблюдения за развитием процесса сдвижения, которые заключались в фиксации проявлений процесса сдвижения - провалов и воронок, трещин на поверхности земли, зданиях и сооружениях [14].

К концу 19 века изучение сдвижений земной поверхности уже широко развилось во многих странах и появилось большое количество работ, посвященных данному вопросу. К этому же периоду времени относится и начало инструментальных наблюдений за сдвигами поверхности, на основании результатов которых определялись не только углы обрушения, но и углы оседания, что имело большое значение для горной промышленности того времени. Ведущую роль в организации первых инструментальных наблюдений сыграл английский исследователь Чарльз Гудвин, чьи наблюдения были опубликованы в 1864 году [14, 15, 16]. В это же время были разработаны «дортмундские правила построения предохранительных целиков под охраняемыми объектами», которые долгое время применялись во всем мире. На

основе этих правил были разработаны Временные правила 1923 и 1927 годов для применения на шахтах Донецкого бассейна [14].

В дальнейшем изучение сдвижений горных пород и земной поверхности продолжало быстро развиваться и всегда сопровождалось инструментальными наблюдениями. На сегодняшний день инструментальные наблюдения за процессом сдвижения проводятся практически на всех месторождения полезных ископаемых и в результате было установлено, что процесс сдвижения горных пород и земной поверхности протекает по-разному не только в различных горнодобывающих регионах, но даже в разных местах одного и того же района.

Кроме того, увеличилась продолжительность непрерывных инструментальных наблюдений за процессом сдвижения, а на некоторых рудниках они выполнялись в течение нескольких десятилетий. В начале 20 века уже были известны примеры наблюдений, проводившихся непрерывно в течении 30 - 50 лет. В 1924 и 1929 году были опубликованы результаты более чем 30-летних наблюдений за процессом сдвижения при отработке пологих пластов небольшой мощности и наблюдения продолжались в последующие годы [14, 16].

В СССР наблюдения за сдвижением поверхности были начаты в 1928-1929 году. Необходимо отметить деятельность таких ученых как И.М. Бахурин, С.Г. Авершин, Д.А. Казаковский, которые внесли огромный вклад в изучение закономерностей процесса сдвижения горных пород. Инструментальные наблюдения выполнялись в Донецком угольном бассейне, а к середине 20 века уже производились практически во всех угледобывающих и горнорудных районах страны.

На протяжении всего периода времени развития маркшейдерских инструментальных наблюдений за процессом сдвижения горных пород в нашей стране методики полевых измерений и камеральной обработки неоднократно изменялись и совершенствовались, однако вплоть до 1955 года они не оформлялись в виде нормативно-методических документов, поэтому в литературе по маркшейдерскому делу, относящейся к 1938-1955 г.г., встречаются различные рекомендации по инструментальным наблюдениям как на угольных, так и на

рудных месторождениях полезных ископаемых, хотя и не противоречивших друг другу, но допускавших некоторые разночтения [14, 17, 18, 19].

В 1932 году в Ленинграде было создано Центральное научно-исследовательское маркшейдерское бюро (ЦНИМБ), которое в 1945 году было реорганизовано во Всесоюзный научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела (ВНИМИ). Благодаря исследованиям ВНИМИ, его филиалов, маркшейдерских кафедр вузов и научно-исследовательских организаций различных ведомств разработано свыше 30 нормативных документов - «Правил», «Инструкций» и «Указаний» по охране сооружений от вредного влияния подземных разработок на угольных, рудных и нерудных предприятиях страны.

Исследования процесса сдвижения горных пород при открытой разработке месторождений полезных ископаемых были начаты в пятидесятых годах 20 века в связи с появлением крупных карьеров и отвалов пустых пород, когда проблемы обеспечения устойчивости откосов вышли на первый план. Основоположником советской школы исследования сдвижений горных пород при открытых разработках считается Г.Л. Фисенко, чьи работы по обеспечению устойчивости бортов карьеров и отвалов [20] до сих пор не потеряли своей актуальности. В дальнейшем большой вклад в изучение устойчивости бортов карьеров и отвалов внесли ученые И.И. Попов, М.А. Ревазов, В.Н. Попов, А.И. Ильин, Н.Н. Куваев, В.Г. Зотеев и другие [21-26].

В 1955 году ВНИМИ были написаны «Методические указания по производству маркшейдерских наблюдений за оползневыми явлениями на угольных карьерах». В то время в СССР еще только проектировались карьеры глубиной до 500 метров.

В методических указаниях выделены 4 формы сдвижения массива горных пород - это: осыпи, обвалы, оплывины и оползни. В работе также описаны методы изучения геологического строения, физико-механических свойств и гидрогеологии массива, конструкции наблюдательных станций для проведения наблюдений, методы непосредственных измерений и обработки полученных

результатов. Стоит отметить, что основными методами ведения мониторинга являлись геометрическое нивелирование 4-го класса и тригонометрическое нивелирование с помощью теодолита с точностью отсчитывания по вертикальному кругу не более 30 секунд [27]. Измерение расстояний между реперами проводилось стальной рулеткой или лентой длиной не менее 30 м.

В 1971 году была издана «Инструкция по наблюдению за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости». В ней указываются следующие виды нарушения устойчивости уступов, бортов и отвалов: осыпи, обрушения, оползни, просадки, оплывины и фильтрационные деформации [28]. Более подробно описаны изучение геологического строения, физико-механических свойств и гидрогеологии массива, а также закладка наблюдательных станций и проведения маркшейдерских работ.

В последующем ВНИМИ выпустило большое количество инструкций и методических указаний, таких как: «Методические указания по обеспечению устойчивости откосов и сейсмической безопасности зданий и сооружений при ведении взрывных работ» 1977 г., «Инструкции по расчету устойчивости бортов разрезов при их ликвидации и обеспечению сохранности прилегающих к разрезам территорий» 1977 г., «Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости» 1987 г. и другие.

В 2019 году группой специалистов из ИПКОН РАН, Санкт-Петербургского горного университета, SRK Consulting, ОАО «ВИОГЕМ», ЯкутНИПРОалмаз, ПАО «Алроса», ИГД УрО РАН были разработаны Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности (ФНП) «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов» [29, 30], а в 2021 они были утверждены.

В ФНП сведены требования по широкому кругу вопросов: инженерно-геологические и гидрогеологические исследования, расчеты устойчивости бортов и уступов карьеров, а также откосов отвалов, методы мониторинга устойчивости

откосов, оценка и анализ геомеханических рисков, управление устойчивостью откосов путем разработки специальных мероприятий по снижению рисков, устойчивость откосов при комбинированной разработке. При этом рассмотрены условия, как для скальных, так и для дисперсных типов пород. В зависимости от сложности и стадии освоения месторождения приведены конкретные виды исследовательских работ, минимальные их объемы и используемые методы анализа [29].

К ФНП дополнительно были разработаны:

- руководство по инженерно-геологическому, гидрогеологическому изучению и районированию массивов горных пород для обоснования устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов;
- руководство по определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов;
- руководство по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов [29].

Как указывалось выше, геомеханический мониторинг состояния массива сводится не только к наблюдению за геомеханическим состоянием объекта, но и прогнозированию момента перехода его в предельное состояние, а последнее невозможно без определения критических значений кинематических параметров обрушений, таких как смещение или их производных (скорости и ускорения).

1.3 Существующие способы определения критических значений кинематических параметров обрушений массивов горных пород

Процесс обрушения можно описывать совокупностью характеристик (параметров). Различают временные, кинематические, геометрические и другие характеристики. Под кинематическими параметрами понимают смещение, скорость и ускорение характерных точек деформирующихся объектов.

Для прогноза потенциального обрушения необходимо определение предельных кинематических параметров деформирования, превышение которых приведет к разрушению массива горных пород, слагающих борт карьера. После определения этих параметров и сравнения их с натурными наблюдениями можно сделать вывод об устойчивости и безопасности ведения горных работ.

Имеющиеся на сегодня методики определения критических параметров разрушения условно подразделяются на три группы:

- к первой группе можно отнести способ выявления эмпирических закономерностей, полученных при анализе результатов наблюдений за деформациями реальных горнотехнических объектов;
- вторая группа основывается на результатах моделирования деформационных процессов: физическом - при помощи эквивалентных материалов, и численном - с применением методов механики сплошной и дискретной среды;
- методики третьей группы можно назвать аналитическими, так как они не основаны на прямых расчетах определенных параметров деформационных процессов.

Подходы **первой группы** являются наиболее простыми и широко распространенным на практике [28, 31-35].

Установлено, что предельные смещения бортов глубоких карьеров перед разрушением могут достигать 0,5 – 2 м [34], а при крутой слоистости до 10 м [28, 32]. По данным Ю.И. Туринцева [34] о скором обрушении борта карьера может свидетельствовать величина горизонтальных деформаций растяжения в

прибортовой полосе $\varepsilon = 5$ мм/м. По другим данным перед разрушением бортов карьеров, до начала третьей стадии разрушения, наблюдаются деформации $\varepsilon = 10 - 30$ мм/м [32].

Согласно исследованиям В.Т. Сапожникова [33] в качестве критических, свидетельствующих о дальнейшем разрушении, следует считать скорости смещения $v = 10 - 15$ мм/сут (данные получены для бортов уральских разрезов). Непосредственно перед обрушением фиксировались скорости смещения $v = 50 - 100$ мм/сут [31].

Основным недостатком подходов данной группы при определении критических значений кинематических параметров является необходимость накопления большого объема эмпирических данных о смещении массива горных пород в конкретных горно-геологических условиях.

Методы **второй группы** основываются на результатах моделирования деформационных процессов физическим и численным методом.

В «Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости», разработанных ВНИМИ [36], метод физического моделирования при помощи эквивалентных материалов указывается как наиболее точный применительно к конкретным горно-геологическим условиям. В эту группу относятся и способы интерпретации данных мониторинга, базирующиеся на анализе результатов опытов физического моделирования [37, 38, 39].

А.М. Мочаловым предложена зависимость для расчета установившейся скорости смещения призмы обрушения [40]:

$$v_0 = a \left(\frac{\Delta F}{\Delta F_0} \right)^b, \text{ при } \frac{\Delta F}{\Delta F_0} > \frac{f_{s\infty}}{f_{s0}} \quad (1)$$

где a и b – определяемые моделированием коэффициенты, зависящие от среды, в которой оформлен откос; $f_{s\infty}$ – предел длительной прочности; f_{s0} – кратковременная прочность горной породы.

$$\frac{\Delta F}{\Delta F_0} = \frac{F_{сдв} - F_{дл}}{F_{ст} - F_{дл}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{сдв}}$ – рассчитанная сумма сдвигающих сил по поверхности скольжения, $F_{\text{дл}}$ – сумма удерживающих сил, рассчитанная по длительной прочности, $F_{\text{ст}}$ – сумма удерживающих сил, рассчитанная по кратковременной прочности.

Основными недостатками данной группы являются: трудоемкость проведения лабораторных испытаний; сложность одновременного соблюдения критериев подобия для деформационных, прочностных и физических характеристик; учет влияния времени.

Методики, основанные на численном моделировании деформационных процессов можно разделить на две подгруппы. Следует отметить, что в настоящей работе будут рассматриваться только способы численного расчета длительных деформаций породных массивов с применением методов механики [41-50], которые позволяют рассчитать критические параметры.

В первую подгруппу отнесем способы расчета с использованием эмпирических, реологических и комплексных законов ползучести [41-44]. Способы данной подгруппы опираются на методы механики сплошной среды, поэтому для них также характерен и основной недостаток - невозможность явного учета разрывов сплошности среды. Кроме того, недостатком данного подхода является сложность определения параметров, принимаемых эмпирических и реологических законов ползучести, причем количество этих параметров растет с усложнением модели, описывающей ползучесть. В дополнении к этому, различные признаки разрушения массивов горных пород, например, образование заколов, раскрытие трещин и смещение по ним, проявляются при значительных пластических деформациях, а измерение кинематических параметров могут выполняться в непосредственной близости от участков локальных разрушений [31].

Во вторую подгруппу отнесены способы в которых используется долговременное снижение модуля деформации [45] и прочности [46-48]. Они могут базироваться как на методах сплошной среды [47], так и на методах дискретной среды [49]. Главными недостатками данного подхода является

отсутствие явного учета времени и допущение о снижении длительной прочности во времени без принятия в расчет причин ее снижения.

Существуют способы, основанные на принятии в расчет напряжений и времени как одного из параметров функции длительной прочности [45, 46, 48]. Реализация данного способа, особенно в методах механики дискретных сред, является наиболее применимой для расчетов долговременных деформаций массивов горных пород, так как в данном случае деформации ползучести моделируются, как следствие развития микро- или макротрещиноватости, в зависимости от размеров модели [31].

Несмотря на удобство применения методов математического моделирования для определения критических параметров обрушений существенным минусом этого метода в целом остается учет неоднородности массива горных пород и технологических процессов, которые влияют на устойчивость уступов и бортов карьеров. Кроме того, для применения вычисленных критических параметров разрушения непосредственно на горных предприятиях необходимо подтверждение их достоверности на реальном объекте и, если данные не подтвердятся, то следует калибровка модели, расчеты и последующая проверка. Учитывая разнообразие параметров, влияющих на процесс обрушения (геология, геометрия уступов, трещиноватости и др.) подбор критических значений может затянуться.

К методикам **третьей группы** можно отнести, например, способ определения текущего коэффициента запаса устойчивости, приведенный в «инструкциях по наблюдениям за деформациями бортов, откосов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости» [31, 32, 50].

Лабораторными испытаниями определяются прочностные и деформационные характеристики горных пород, после чего находится функциональная зависимость.

$$\varepsilon = F\left(\frac{\tau}{\tau_{пр}}\right) \quad (3)$$

где ε – деформация сдвига; τ – частное значение сдвигающего напряжения; $\tau_{пр}$ – предельное значение сдвигающего напряжения.

Далее по смещениям реперов находятся фактические деформации уступа или борта в прибортовой зоне ε_f .

Коэффициент запаса устойчивости определяется как $n = \frac{\tau_{пр}}{\tau}$, где отношение $\frac{\tau_{пр}}{\tau}$ принимается с графика деформации сдвига при фактическом значении ε_f . Данный критерий оценки опасности наблюдаемых деформаций основан на предположении о прямой корреляции величин смещений с размерами объекта при его разрушении.

Методики этой группы не позволяют напрямую определить предельные значения кинематических параметров, однако подходят для расчетов коэффициентов запаса устойчивости участков борта.

В данной работе будет применяться методика первой группы – выявление эмпирических закономерностей, полученных при анализе результатов наблюдений за разрушениями реальных горнотехнических объектов. Несмотря на трудоемкость данного метода, на сегодняшний день этот метод может дать достоверные результаты при определении критических кинематических параметров разрушения массивов. Особенно это актуально для карьеров, расположенных в скальных высокопрочных массивах горных пород, которые при всей своей прочности являются и достаточно хрупкими, а значит, прогноз процессов разрушения затруднителен.

Ярким представителем подобных месторождений является Ковдорское месторождение апатитовых и магнетитовых руд.

1.4 Анализ условий отработки Ковдорского месторождения апатитовых и магнетитовых руд

1.4.1 Горно-геологические, геомеханические и горнотехнические условия отработки Ковдорского месторождения

Территория Мурманской области почти целиком располагается в северо-восточной части Балтийского щита Восточно-Европейской платформы (Рисунок 1.1). Вдоль северо-восточного побережья Кольского полуострова протягивается Мурманский блок, сложенный преимущественно гранитоидами и мигматитами позднего архея. Южнее разломной зоны, трассирующей от горловины Печенгской губы на юго-восток до низовий Поноя, в пределах Центральнокольского блока, распространены различные гнейсы позднего архея, породы зеленокаменных поясов (кварциты, мета- конгломераты, метавулканы), прорванные позднеархейскими гранитоидами (к северо-западу от Верхнетуломского водохранилища), габбро- анортозитами (в юго-восточной части блока) и Хибинским и Ловозерским массивами щелочных магматическими пород позднего девона. Южнее - от границ с Норвегией в направлении озера Имандра и далее в верховья Варзуги и Стрельны - протягивается, образуя раздувы и пережимы, древняя рифтовая зона, сложенная метаэффузивами и метаосадками нижнего протерозоя. Юго-западная часть области принадлежит Лапландско-Беломорскому архейско-раннепротерозойскому гранулитогнейсовому поясу. На крайнем юго-западе Мурманской области к границе с Финляндией примыкает широкое поле раннепротерозойских метаэффузивов основного состава. Вдоль Терского берега раннедокембрийские комплексы перекрыты чехлом красноцветных песчаников рифея. На полуостровах Средний и Рыбачий, относящихся к Южно-Баренцево-Тиманской складчатой системе, распространены песчаники и глинистые сланцы верхнего протерозоя [51].

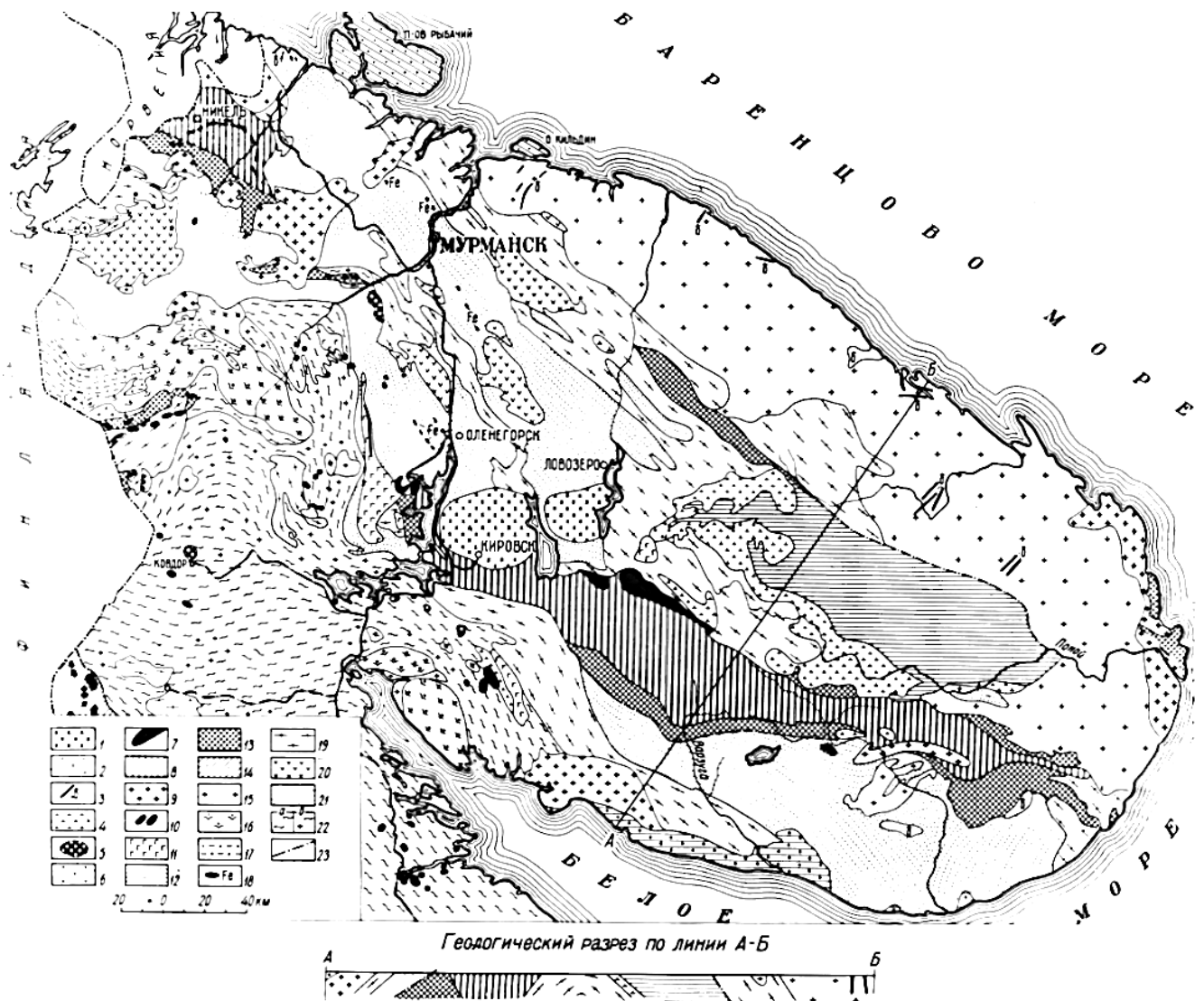


Рисунок 1.1 – Геологическая карта Мурманской области: Палеозой и эопалеозой:

1 - нефелиновые сиениты; 2 - конгломераты и красноцветные песчаники терской свиты;

3 - дайки и штоки диабазов и габбро-диабазов; 4 - щелочные граниты; 5 - щелочные и ультраосновные и основные породы; 6 - песчаники, конгломераты и сланцы п-ова Рыбачий и о. Кильдин (гиперборей) Протерозой: 7 - ультраосновные и основные интрузии;

8 - зеленокаменные породы с прослоями филлитов, песчаников, кварцитов и доломитов (серии: Имандра-Варзуга, Печенгская); 9 - микроклиновые граниты и гранодиориты (3 группа); 10 - перидотиты, пироксениты и габбро; 11 - габбро, габбро-нориты и габбро-анортозиты;

12 - гнейсы, кианитовые и слюдяные сланцы свиты Кейв; 13 - сланцевые амфиболиты, гнейсы и различные сланцы тундровой серии; 14 - метадиабазы, шаровые лавы и зеленые сланцы надвоицкой серии. Архей: 15 - плагиомикроклиновые и микроклиновые граниты (2 группа); 16 - основные гранулиты: гнейсо-грэниты и гиперстеновые гнейсо-диориты; 17 - кислые гранулиты; 18 - месторождение железистых кварцитов; 19 - олигоклазовые гнейсо-граниты (1 группа; 20 - гиперстеновые диориты с подчиненными им основными и ультраосновными породами, чарнокитами и пироксено-магнетитовыми сланцами; 21 - гранато-биотитовые и слюдяные гнейсы кольской свиты и мигматиты по ним; 22 - гранато-биотитовые и биотитовые гнейсы беломорской свиты (а) и мигматиты по ним (б); 23 - линии тектонических контактов [52].

Важнейшие полезные ископаемые Мурманской области - руды меди и никеля, железа, апатита и нефелина, редких металлов и редкоземельных элементов, хрома, металлов платиновой группы. По запасам сульфидных медно-никелевых руд Мурманская область занимает одно из ведущих мест в России; месторождения сосредоточены, главным образом, в Печенгском районе (Ждановское, Заполярное, Котсельваара, Семилетка и др.). Железные руды представлены железистыми кварцитами Оленегорского месторождения и апатит-магнетитовыми рудами Ковдорского месторождения. В Мурманской области сосредоточена подавляющая часть извлекаемых запасов апатитовых руд РФ, представленных: комплексными апатит-нефелиновыми рудами Хибинской группы и комплексными апатит-магнетитовыми рудами с бадделеитом Ковдорского месторождения. Крупные запасы руд редких металлов заключены в месторождениях Ловозерского и Ковдорского массивов, а также в массивах Вороньих Тундр, Вуориярви, Себлявр и Салланлатва. Разведаны запасы Фёдорово-Панского месторождения металлов платиновой группы. Имеются коренные месторождения и проявления руд хрома (Сопчеозерское месторождение, проявление Большая Варака), титана (наиболее перспективное месторождение Юго-Вост. Гремяха), флогопита и вермикулита (Ковдорское), керамических пегматитов (Куру-Ваара), амазонита (Плоскогорское), гранитов (Кузреченское), кварца (Перчатка) и др. [51].

Ковдорское месторождение апатитовых и магнетитовых руд (Рисунок 1.2) располагается в юго-западной части Ковдорского массива центрального типа. Строение массива отчетливо кольцевое. Ядро сложено наиболее древними породами – оливинитами, которые окружены прерывистой оболочкой пироксенитов [52].

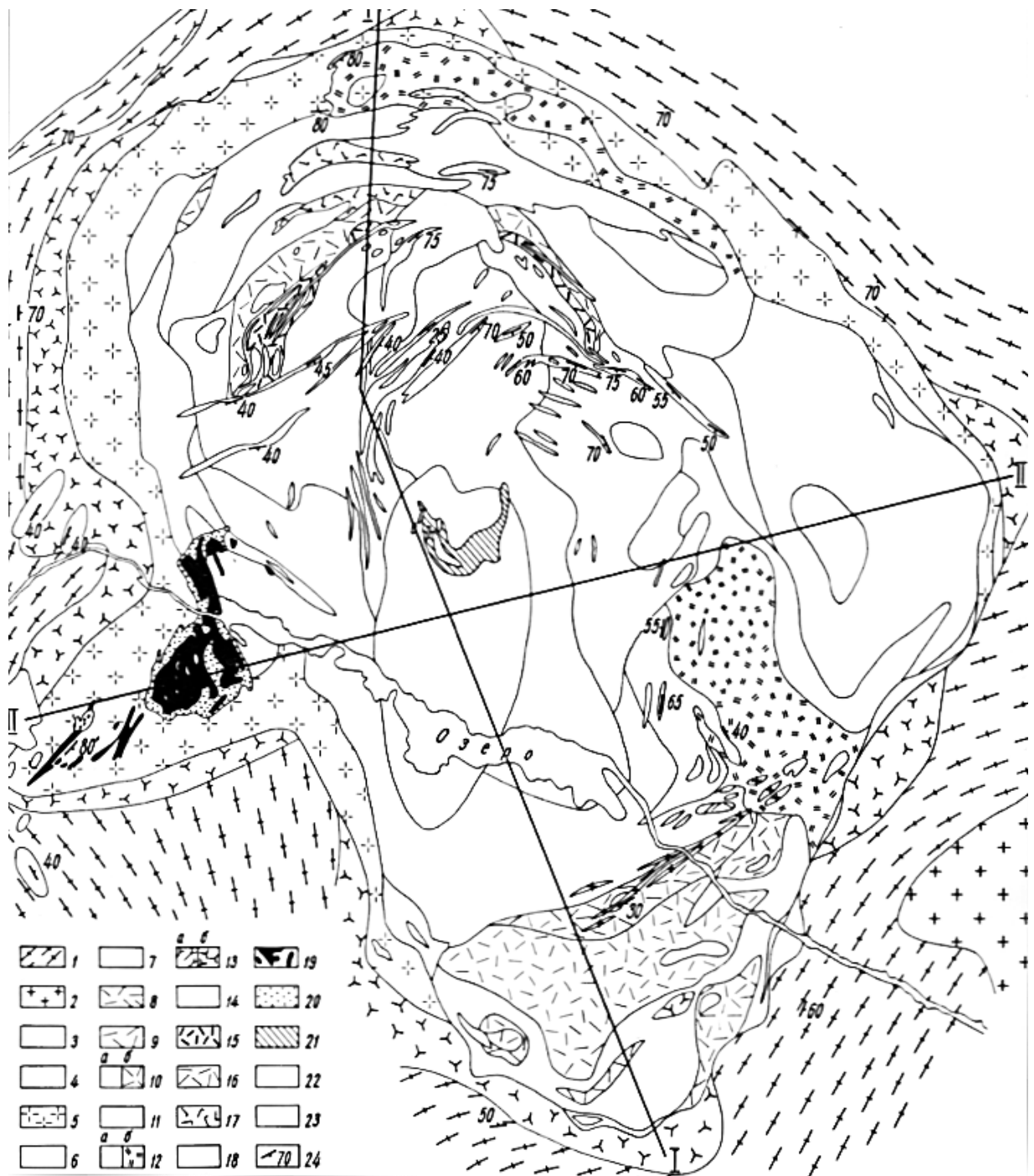


Рисунок 1.2 - Геологическая карта Ковдорского массива (по Терновому В.И.)

- 1 - гнейсы и гнейсо-граниты олигоклазовые; 2 - граниты; 3 - оливиниты; 4 - ийолиты среднезернистые; 5 - ийолит-уртиты; 6 - ийолиты полевошпатовые; 7 - щелочные пироксениты; 8 - слюдяно-пироксеновые породы; 9 - слюдиты; 10 а) пироксенизированные оливиниты; б) ослоденелые оливиниты; 11 - мончителлиты; 12 а) мелилиты; б) фурьяиты; 13 а) фениitized гнейсы; б) фениты; 14 - гранат-амфибол-монтичеллитовые скарны; 15 - флогопит-диопсид-оливиновые породы крупнозернистые и пегматоидные; 16 - флогопит-диопсид-оливиновые породы среднезернистые и мелкозернистые; 17 - амфибол-диопсидовые породы; 18 - флогопитизированные и диопсидизированные оливиниты; 19 - магнетитовые руды; 20 - апатито-оливиновые породы; 21 - зона развития магнетитовых жил (центр.магн.аномалия); 22 - карбонатиты; 23 - сунгулит-гидрохлоритовые породы; 24 - элементы залегания

Ковдорское месторождение представляет собой дугообразную прерывистую зону, обращенную выпуклостью на юго-восток, с кулисным размещением относительно друг друга ее основных рудных тел. В направлении с севера на юг эта зона меняет свою ориентировку с субмеридиональной на юго-западную. На участке ее изгиба локализуется основная масса руд, образуя субвертикальную трубообразную главную рудную залежь, от которой к северу отходит апофиз в виде сильного вытянутого по простиранию столба. К юго-западу от главной залежи рудная зона трассируется телами линзовидной и жилевидной формы и отвесного падения. В обратном северо-восточном направлении, в окружающих главную залежь гипербазитах, установлен уплощенный расширяющийся с глубиной рудный столб, вершина которого вскрыта в восточном борту действующего карьера [53].

С поверхности коренные породы перекрыты почти сплошным чехлом четвертичных отложений преимущественно озерно-ледниковых, флювиогляциальных и аллювиальных фаций, состоящих из валунно-галечного, песчаногравийного и супесчаного материала. Мощность таких отложений колеблется от 0,5 до 20-35 м [53-57].

На базе месторождения функционирует АО «Ковдорский ГОК». Месторождение отрабатывается открытым способом карьерами магнетит-апатитовых руд (МАР) (карьер «Железный») и апатит-штафелитовых руд (АШР) [53, 58, 59].

1.4.2 Физико-механические свойства горных пород

Физико-механические свойства пород тесно связаны с их петрографическими особенностями. Исходя из этого все геологические образования Ковдорского месторождения специалистами Федерального государственного унитарного предприятия (ФГУП) «Институт ВИОГЕМ» разделены на 6 литотипов: 1 – метаморфиты; 2 – гипербазиты; 3 – щелочные

породы; 4 – апатит-силикатно-магнетитовые руды; 5 – апатит-карбонатно-магнетитовые руды и карбонатиты; 6 – породы зоны дезинтеграции Д₁ [53].

Первый литотип включает гнейсы, фенитизированные гнейсы, амфиболиты и твейтозиты. Наибольшим распространением пользуются фениты, слагающие юго-восточную часть месторождения. В них очагово в виде прожилков, гнезд, мелких тел неправильной формы развит флогопит, иногда совместно с апатитом. Вблизи крупных карбонатитовых тел фениты подвергаются карбонатизации, которая также сопровождается появлением флогопита [53].

Второй литотип представлен оливинитами и пироксенитами. Ими сложена северная и северо-восточная части месторождения. Для всех перечисленных пород, особенно пироксенитов, характерно повсеместное, но очень неравномерное развитие флогопита и карбоната [53].

Третий литотип охватывает породы ийолит-мельтейгитовой серии, развитые по-западному и, в меньшей степени, восточному борту карьера, характерно развитие по ийолитам тонких (0,2-10 мм) прожилков черного мелкочешуйчатого слюдита в ассоциации с сульфидами (пирротин, пирит). В измененных разностях ийолитов пироксен замещается ийолитом и флогопитом, по нефелину развивается канкринит, содалит и цеолиты, появляются волластонит и кварц [53].

Четвертый литотип представлен апатит-форстеритовыми, флогопит-apatит-форстеритовыми породами (маложелезистыми апатитовыми рудами), форстерит-магнетитовыми и апатит-форстерит-магнетитовыми рудами [53].

Пятый литотип включает форстерит-кальцитовые и доломитовые карбонатиты, апатит-кальцит-магнетитовые и кальцит-форстерит-магнетитовые, редкометальные гумит-apatит-кальцит-магнетитовые и доломит-форстерит магнетитовые руды [53].

Шестой литотип представлен продуктами зоны выветривания и интенсивной дезинтеграции пород и руд всех предыдущих литотипов (глинисто-суглинистая и супесчано-дресвяная масса с многочисленными реликтами скальных слабыветрелых пород, штаффелитовые руды). Хотя среди пород шестого литотипа имеются рыхлые несвязанные грунты, но с учетом их

подчиненного развития и преобладаемости с реликтами слабыветрелых пород и гипергенно сцементированных штафеллитовых руд, в целом, образования этого литотипа можно отнести к скальным грунтам. Наиболее широко они развиты в углублениях зоны интенсивной дезинтеграции, которые контролируются тектоническими нарушениями первого порядка (юго-восточный, юго-западный северо-восточный борта карьера).

В таблице 1.1 приведены основные значения пределов прочности на сжатие и растяжение, а также значения сцепления и угла внутреннего трения горных пород инженерно-геологических литотипов [53, 60].

Таблица 1.1 - Основные физико-механические характеристики инженерно-геологических литотипов

Петрографический тип породы, руды	Предел прочности		Сцепление (C), МПа	Угол внутреннего трения (φ), °
	при сжатии (σ _{сж}) МПа	при растяжении (σ _р), МПа		
Первый литотип				
Амфиболит	170	19	24,5	64
Гнейс	122	11	18	57
Гнейс фенитизированный	130-228	6,6-10,8	22	67
Фенит	209-350	9,1-23	20-42	56-62
Фенит карбонатизированный, ослюденелый с прожилками флогопита, флогопита с кальцитом	29-162	4,1-5,8	3-9	42-52
С учетом только гипогенно - измененных разностей	29-162	4,1-5,8	3-9	42-52
Для литотипа в целом	122-350	6,6-23	18-42	52-67
Второй литотип				
Оливинит	131-145	11-12,8	15-17	48-50
Оливинит карбонатизированный, ослюденелый	99-123	8,5-10,6	10-15	43-47
Оливинит с прожилками флогопита и карбоната	71-78	5,3-7,4	6,0-8,0	47-51
Оливинит скарнированный (апо- оливинитовый скарн)	72-131	7,3-13,4	-	-
Пироксенит	79-197	3,7-15	9,0-15	54-56

Продолжение таблицы 1.1

Пироксенит карбонатизированный, ослюденелый	47-84	3-9,2	6,0-19	39-40
Для литотипа в целом	72-197	3,7-15	6,0-17	43-56
С учетом только гипогенно измененных разностей	47-84	3,0-9,2	6,0-19	39-40
Ийолиты-мейтельгиты	191-202	15-16	29	-
Ийолит ослюденелый, карбонатизированный	48-198	5,5-10	7,0-21	35-53
Лит с прожилками гонита	20	1,9	3,5	47
Для литотипа в целом	191-202	15-16	29	-
С учетом только гипогенно измененных разностей	20-198	1,9-10	3,5-21	35-53
Четвертый и пятый литотипы				
Для литотипа в целом	43-108	3,3-8,1	5,0-16	48-62
Шестой литотип				
Фенит выветрелый, штаффелитизированный	21,4	2,6	4,1	52
Апатит-штаффелитовые плотные	25,0-40	2,9-3,7	4,2-6,0	50-54
В целом по связанным грунтам	21,4-40	2,6-3,7	4,1-6,0	52-54
Штаффелит-апатитовые руды рыхлые	0,6-1,5	0,17-0,5	0,2-0,4	31-36

Все литотипы, исключая шестой, относятся к очень прочным ($\sigma_{сж} = 120$ МПа) или прочным ($\sigma_{сж} = 50-120$ МПа) породам, хотя гипогенные изменения пород заметно снижают их прочность. Только в зоне интенсивной дезинтеграции преобладают скальные грунты средней прочности ($\sigma_{сж} = 15-50$ МПа), малопрочные ($\sigma_{сж} = 5,0-15$ МПа) и полускальные ($\sigma_{сж} = 5,0-15$ МПа), а также рыхлые грунты в совокупности образуют шестой литотип [50].

1.4.3 Геолого-структурные особенности месторождения

В 80-х годах 20 века были начаты исследования структурно-геологического строения Ковдорского месторождения железных руд. Необходимо особо отметить работу специалистов института ВИОГЕМ [54, 57], которые применяли поверхностную съёмку элементов трещиноватости и увязывали её с некоторым

количеством специально пробуренных структурно-геологических скважин. В результате было выделено 5 уровней структурной нарушенности массива пород от крупных тектонических структур, пересекающих всё карьерное пространство, до небольших трещин, залегающих в пределах одного уступа, а массив пород разделён на зоны по вертикали (вертикальная зональность). В горизонтальной плоскости было выделено 22 инженерно-геологических блока (ИГБ) и несколько подблоков, каждый из которых полагался квазиоднородным с точки зрения слагающего его литотипа и трещиноватости. В результате была сформирована инженерно-геологическая модель месторождения [54, 57]. На базе разработанной инженерно-геологической модели месторождения выполнялись оценки устойчивости борта карьера [54].

По мере развития горных работ в карьере и доизучения структурно-геологического строения отдельных участков массива горных пород появлялись новые данные и структурно-геологическая модель месторождения пересматривалась, однако вертикальная зональность месторождения осталась неизменной. В настоящее время оценки устойчивости борта карьера базируются на структурно-геологической модели Д.В. Жирова (Геологический институт КНЦ РАН) (Рисунок 1.3) [53].

Верхняя зона интенсивной дезинтеграции (Д) характеризуется переходом первичных скальных пород в глинисто-суглинистую и супесчано-дресвяную массу, сохраняющую изначальный структурный рисунок субстрата и исключаящую многочисленные реликты слабо выветрелых скальных пород. Глубина нижней границы колеблется от 0,2 до 2,0 м по фенитам и ийолитам до 15-20 м по гипербазитам резко увеличиваясь до 80-100 м в крупных зонах трещиноватости независимо от состава первичного субстрата. Карбонатиты в таких зонах часто превращаются в штафелитовые руды или лимонитизированную дресву. Наиболее мощная зона дезинтеграции Д₁, связанная с субмеридиональной тектонической зоной, залегает в южном борту карьера [53].

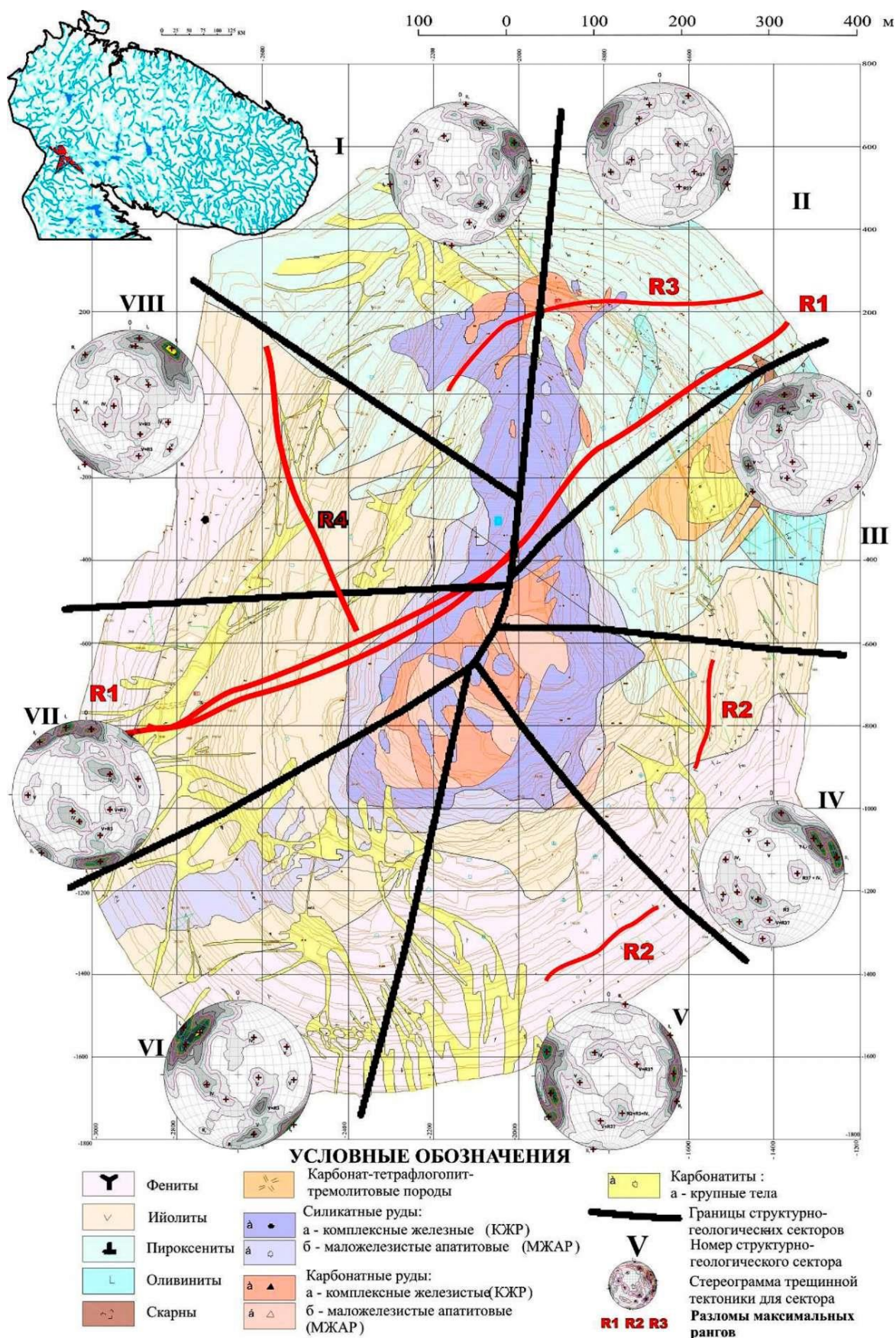


Рисунок 1.3 - Схема инженерно-геологического районирования рудника «Железный». На врезке показано положение Ковдорского месторождения в пределах Кольского полуострова (по Д.В.Жирову с исп. данных ОАО МГРЭ)

Глубже идет зона слабой дезинтеграции (D_2) в которой сами породы почти не выветрены, за исключением расположенных в них даек карбонатитов. Разрывные нарушения в зоне D_2 представлены супесчано-щебеночным материалом с обилием гидратированной слюды. Эта зона с постепенным затуханием прослеживается до глубины 100-150 м, но контрастно проявлена до глубины 80 м, причем участки наибольшего ее углубления четко контролируются крупными тектоническими зонами. В зоне дезинтеграции (D_1+D_2) трещиноватость пород, по данным изучения керна разведочных скважин, с глубиной постепенно уменьшается. Эта закономерность подтверждена многолетними исследованиями сотрудников АО «Ковдорский ГОК», которые показали увеличение с глубиной среднего размера естественной отдельности от 0,1-0,2 м вблизи поверхности до 0,6-0,9 м на горизонте +190 м. Эта отметка ориентировочно соответствует нижней границе зоны дезинтеграции (D_1+D_2), которая определялась во многом местным базисом эрозии (дном озера Ковдора), т.е. уровнем «промыывания» пород нисходящими подземными водами [53].

Ниже зоны дезинтеграции (D_1+D_2) до самой границы разведанного контура месторождения горный массив в естественном залегании характеризуется стабильным средним размером отдельности (1,0-1,5 м), сомкнутостью трещин и практически непроницаем, за исключением тектонических зон повышенной трещиноватости или раскрытости трещин, уходящих на большие глубины [53].

Прочностные свойства контактов определялись ранее специалистами Горного института КНЦ РАН Г.А. Ковалевой, Г.М. Ереминым [60-62]. Выполнялись определения параметров паспортов прочности различных поверхностей ослабления массива Ковдорского месторождения. Определения параметров проводились по результатам испытания образцов керна скважин. Исследовалось несколько типов контактов: карбонатит-карбонатит, фенит-фенит, пироксенит-пироксенит. Для сравнения был исследован контакт бетон-бетон и бетон-влажная глина-бетон. Значения сцепления C' для породных контактов лежат в диапазоне от 0,25 МПа до 0,55 МПа; $\varphi' = 24^\circ - 42^\circ$. Характеристики контакта бетон-бетон: $C' = 0,12$ МПа; $\varphi' = 23^\circ$. Заполнение контакта влажной глиной снижает

значение C' до 0,02 МПа, угол трения ϕ' при этом остается неизменным. Значения характеристик паспорта прочности контактов приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Прочностные характеристики по поверхностям ослабления [60]

Тип поверхности ослабления	C' , МПа	ϕ' , град
Карбонатит-карбонатит	0.30-0.35	35-42
Фенит-фенит	0.25-0.55	24-36
Пироксенит-пироксенит	0.35-0.40	36-37
Бетон-бетон	0.12	23
Бетон-влажная глина-бетон	0.02-0.03	23

1.4.4 Напряженно-деформированное состояние массива горных пород

Ранее исследования напряженного состояния проводились с использованием апробированного метода дискования керна (МДК). В основе МДК лежит эффект разделения керна на диски при его отборе за счет влияния напряжений, действующих перпендикулярно оси скважины и приводящих к возникновению растягивающих деформаций параллельных оси керна. Одним из основных параметров, характеризующих уровень действующих напряжений, является соотношение h/d (h - толщина диска; d - диаметр скважины). Численное значение показателя h/d обратно пропорционально абсолютным величинам сжимающих напряжений [63]. Весь отобранный из инженерно-геологических скважин керн документировался и фотографировался [64], что дает возможность в случае необходимости провести дополнительный анализ.

В работах [62, 65] изложен детальный анализ результатов исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) по материалам геологоразведочного кернового бурения. Уровень действующих горизонтальных напряжений σ_d на участках дискования, ориентировочно, без учета всего возможного перераспределения в слоистом массиве, составляет от 7,6 МПа до 39 МПа (исходя из гипотезы, чисто гравитационного поля напряжений в массиве σ_d

не должно превышать 10 МПа на глубинах до 400 м). Выделены участки массива с повышенным и пониженным уровнем дискования керна. Установлено, что интенсивность дискования выше в северной части прибортового массива, а в южной части, напротив, дискование не отмечается на всем протяжении скважин. Выявлена приуроченность дискования керна к различным литологическим разностям, при этом необходимо отметить, что отсутствие дискования не является однозначным свидетельством отсутствия горизонтальных действующих напряжений, т.к. на дискование оказывает влияние соотношение всех трех компонент поля напряжений.

К настоящему времени в карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК» выполнен большой объём экспериментальных определений параметров напряжённого состояния.

На рисунке 1.4 приведены результаты анализа НДС массива пород, а также районирование карьера «Железный» с точки зрения уровня действующих напряжений с учетом геолого-структурных особенностей массива горных пород [53]. Красными кружками отмечены места заложения наблюдательных станций. Массив пород карьера разделён на 8 секторов на основе предварительного инженерно-геологического районирования.

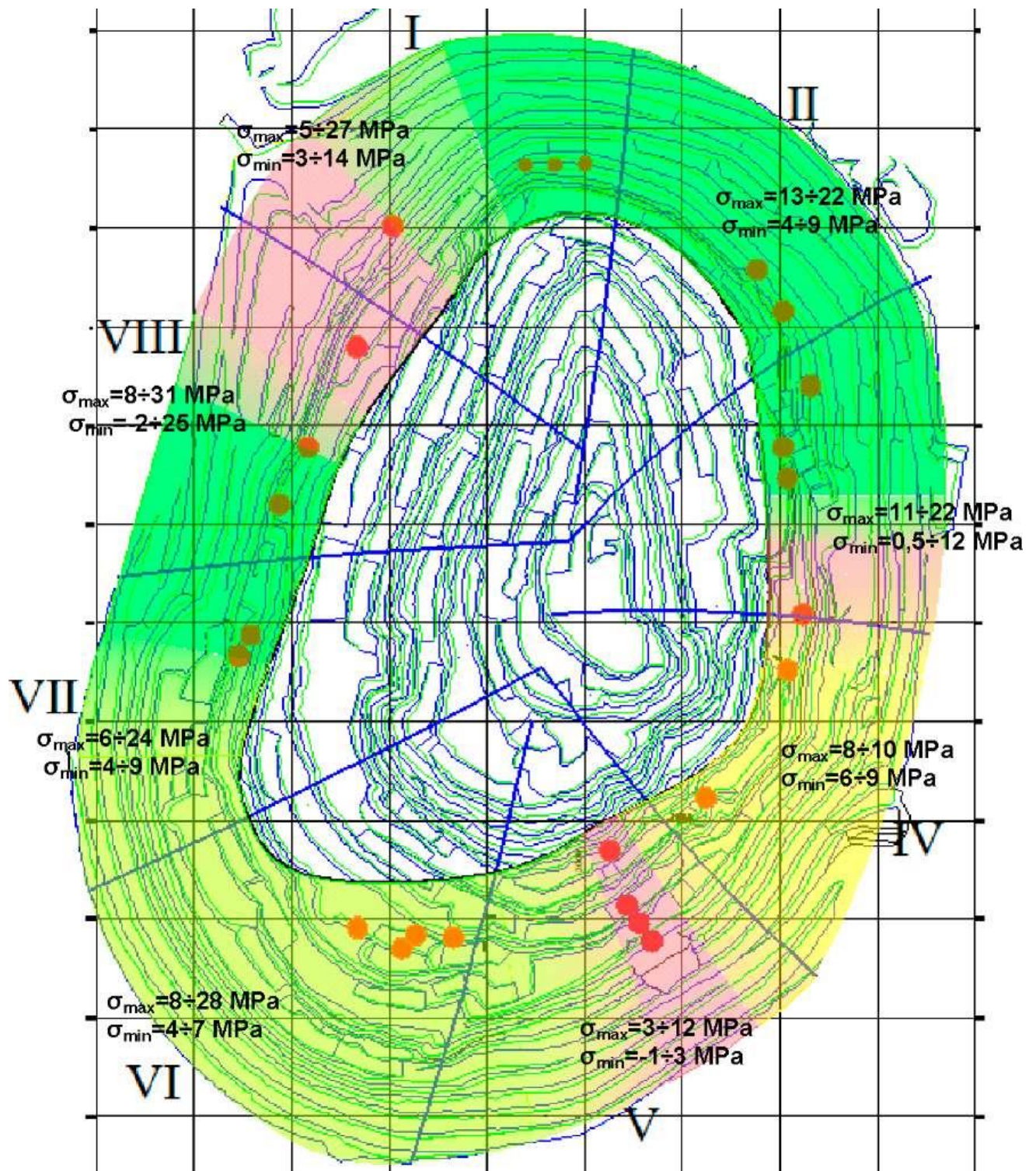


Рисунок 1.4 - Районирование карьера «Железный» по величинам действующих напряжений с учетом геолого-структурных особенностей строения массива горных пород.

I-VIII - инженерно-геологические секторы; - места заложения наблюдательных станций; зелёный цвет - наиболее благоприятные зоны, с точки зрения действующих в массиве пород напряжений; жёлтый - менее благоприятные зоны; красный - наименее благоприятные зоны [53]

В результате анализа данных исследований НДС приконтурного массива горных пород можно сделать вывод, что с точки зрения действующих напряжений наиболее благоприятными зонами являются северный и северо-западный участки, которые отмечены на схеме преимущественно зеленым цветом. В пределах этих зон массив пород умеренно сжат, а максимальная компонента главных напряжений $\sigma_{\max}$ - субгоризонтальна. Менее благоприятными зонами представляются южный и юго-восточный участки борта карьера, которые отображены светло-зеленым и желтым цветами. Здесь напряжённое состояние массива пород характеризуется меньшими значениями действующих напряжений, $\sigma_{\max}$ в половине измерений субвертикальна, а минимальная компонента главных напряжений $\sigma_{\min}$ изменяется в пределах от 0,5 до 9 МПа. Наименее благоприятные участки не только с точки зрения уровня действующих напряжений (имеют место локальные зоны растяжений), но и наличия в массиве пород геолого-структурных неоднородностей высокого ранга, залегание которых относительно конечного контура карьера может представлять опасность для устойчивости группы уступов, [53] отмечены красным цветом.

На основе приведенных данных о напряженно-деформированном состоянии массива Ковдорского месторождения, можно сделать вывод о его принадлежности к гравитационно-тектоническому типу.

1.4.5 Горнотехнические особенности отработки месторождения

Как было указано выше Ковдорское месторождение отрабатывается двумя карьерами МАР (карьер «Железный») и АШР, первый из которых является основным. Данный карьер в настоящее время имеет в плане форму, приближающуюся к овалу. Расстояние между северным и южным бортами карьера составляет ориентировочно 2,5 км, между западным и восточным бортами ориентировочно 2 км. Глубина карьерной выемки в настоящее время (2023 г.) составляет ориентировочно 600 м.

Рабочие уступы имеют высоту 12 м или 15 м. При постановке на конечный контур рабочие уступы сдваиваются и их высота становится, соответственно, 24 м или 30 м. Угол откоса уступов на конечном контуре в скальных породах составляет 60° или 75° .

В существующих проектах отработки карьера МАР заложены углы откосов конечных бортов $35-40^\circ$. В предпроектных проработках конструкции конечного контура, выполненных АО «Гипроруда», значения результирующих углов наклона борта по различным секторам лежат в пределах от 42° до 53° при конечной высоте борта 650 м [64].

С 1987 по 2022 год в пределах прибортового массива пород карьера МАР задокументировано 30 паспортов деформаций уступов. Минимальный зафиксированный объём потерявшего устойчивость участка массива пород составил 70 м^3 (эпизод № 12; 2011 г.), максимальный – $180\,000 \text{ м}^3$ (№ 21; 2015 г.). В первом случае имела место потеря устойчивости участком отдельного уступа, а во втором - в процесс потери устойчивости была вовлечена группа уступов со стороны восточного участка борта карьера.

Механизм потери устойчивости в основном связан с подсечением карьерными откосами неблагоприятно залегающих крупных трещин (наиболее крупные случаи потери устойчивости), осыпями (небольшие по объёму случаи потери устойчивости).

Следует заметить, что к настоящему времени случаи потери устойчивости сосредоточились в основном со стороны юго-восточного, южного и юго-западного участков борта карьера. Со стороны северо-восточного и западного участков борта, эпизоды потери устойчивости носят единичный характер.

В целом, анализ паспортов потери устойчивости свидетельствует об имеющихся вопросах, связанных с устойчивостью борта карьера со стороны восточной и юго-восточной его части и относительно спокойной обстановке со стороны других участков борта карьера.

На сегодняшний день карьер МАР является основным и все исследования, приведенные в настоящей работе, выполнены там, однако необходимо кратко упомянуть основные характеристики карьера АШР.

На момент написания настоящей работы (2023 год) карьер АШР имеет подковообразную форму с размерами по длинной оси 1,7 км, а по короткой 0,8 км. Глубина карьера составляет 70 метров. Борт карьера по проекту имеет угол наклона от 27° до 60° и сложен уступами высотой 12 метров и углами откосов от 40° до 60° . Проектная глубина карьера составляет 178 метров.

Выводы к главе 1

На сегодняшний день многие крупные карьеры в России и мире уже превышают глубины 500 метров. Такие глубокие горизонты характеризуются действием более высоких напряжений, изменяются гидрогеологические условия отработки месторождения, а также деформационно-прочностные свойства массивов горных пород. В результате проблемы, связанные с обеспечением устойчивости бортов и уступов карьеров, становятся все более актуальными.

Для проведения соответствующих мероприятий по обеспечению устойчивости бортов и уступов карьера необходимо получать достоверную информацию об изменениях свойств массива горных пород, а также выявлять потенциально неустойчивые участки карьера. Все вышесказанное невозможно проводить без организации системы геомеханического мониторинга состояния массива горных пород

Геомеханический мониторинг состояния массива сводится к наблюдению за геомеханическим состоянием объекта и прогнозированию момента перехода его в предельное состояние. Последнее невозможно без определения критических значений кинематических параметров обрушений, таких как смещение или их производных (скорости и ускорения).

Существует несколько способов определения критических значений кинематических параметров. Один из самых достоверных методов — это выявления эмпирических закономерностей, полученных при анализе результатов полевых наблюдений за обрушениями

Особенно актуальным остается вопрос определения критических параметров деформирования массивов прочных скальных пород, характерных для условий месторождений, расположенных на северо-западе Российской Федерации и, в частности, Ковдорское месторождение магнетитовых и апатитовых руд.

2 Исследование закономерностей изменения кинематических параметров обрушений массивов прочных скальных пород

Как указывалось в предыдущей главе, в данной работе исследование кинематических параметров обрушений будет выполняться методом выявления эмпирических закономерностей, полученных при анализе результатов полевых наблюдений за обрушениями. Для наблюдений за состоянием массива до обрушения и вовремя активной стадии одним из самых эффективных методов до сих пор является применение геодезических методов сбора информации.

2.1 Геодезические методы сбора информации о состоянии массива горных пород

История развития геодезических приборов берет свое начало со времени строительства оросительных каналов в древнем Вавилоне, Китае и Египте, то есть от XIII века до н.э. Их появлению способствовала необходимость использования топографических карт при боевых действиях армий. Угломеры привнесли в геодезию астрономы. Отвесы и ватерпасы возникли вместе с землемерным делом [66].

В 200 г. до н.э. Эратосфен с помощью солнечных часов инструментально смог определить окружность Земли. Уже в 220 году до н.э. Гиппарх предложил астролябию с лимбом, первый прообраз теодолита [67].

Угломер Герона, римский землемерный крест и усовершенствованный арабами китайский компас для измерения углов – это все этапы развития геодезических приборов [66].

В 1593 г. немецкий математик Клавиус придумал принцип нониуса, а в 1609 г. Галилео Галилей изобрел зрительную трубу. В 1662 г. француз Тевено сконструировал цилиндрический уровень, а в 1674 г. итальянец Мантанари для зрительной трубы предложил дальномерные нити [66].

Англичане Сиссон и Рамсден в XVIII создали первый теодолит, практически аналогичный современному прибору, с винтовым микрометром и окуляром. Много различных оптических приборов построили русские мастеровые Беляев и Колосов при Петре I. Среди них значилась трубка с ватерпасами, то есть нивелир. В начале XIX века в России было несколько мастерских, которые специализировались на геодезических приборах. Из-под рук мастеров выходили астролябии с трубами, базисные приборы и теодолиты, многие из которых были проданы в Европу [66].

Геодезическое приборостроение к концу XIX века оформилось в самостоятельное направление. Промышленность освоила высокоточные нивелиры Геденова, триангуляционные теодолиты, тахеометры Санге и Гаммера, внутрибазные дальномеры, а в первую мировую войну – даже оптические теодолиты [66].

К 30-м годам и в Советском Союзе заводы «Геофизика» и «Аэрогеоприбор» начали выпускать серийно высокоточные триангуляционные теодолиты, астрономические универсалы и нивелиры, а к началу второй мировой войны и все другие виды геодезического оборудования. О размахе работы геодезистов очень хорошо говорит даже такой факт: во время войны было выпущено 38 млн. специальных топографических карт [66].

Послевоенное приборостроение развивается по нескольким направлениям. Приборы становятся легче, надежнее, эргономичнее и удобнее.

С развитием радиотехники были разработаны новые методы свето- и радиодальномерных измерений, на основе которых в XX столетии созданы светодальномеры и радиодальномеры. Практическое широкое использование светодальномеров связано с созданием в 1952 г. Э. Бергстрандом (Швеция) первого фазового дальномера, названного геодинетром [66].

В России создателями первого светодальномера являются В.А. Величко и В. П. Васильев, которые в 1953 г. разработали светодальномер на основе авторского свидетельства на изобретение Г.И. Трофимука, выданного в СССР в 1933 г. Первый радиодальномер, названный теллуromетром, был создан Уодли в ЮАР в

1956 г. Этим радиодальномером можно было измерять расстояния до 60 км с ошибкой в несколько см. Несколько позднее (в 1960 г.) в нашей стране под руководством А.А. Генике был разработан первый отечественный геодезический радиодальномер — ВРД [66].

Традиционные методы геодезии, такие как нивелирные измерения I, II, III и IV классов [68] и светодальномерные измерения до сих пор остаются популярными в отечественной практике мониторинга. Нивелирные измерения выполняются на геодинамическом полигоне Астраханского газоконденсатного месторождения (АГКМ) [69], на геодинамическом полигоне на территории Шемахинской астрономической обсерватории [70] и в карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК». Примером применения светодальномерных измерений является полигон Усть-Каменогорского шлюза в Казахстане [71], а также на таких зарубежных месторождениях как: Palabora (ЮАР), Chuquibambilla (Чили), BarrickPorgera (Попуа Новая Гвинея), Sunrise Dam Gold Mine (Австралия) и др.

В 1978 году был запущен первый навигационный спутник системы Navigation Satellite providing Time and Range (NAVSTAR), позже система была переименована в Global Position System (GPS) и это событие стало новым витком развития геодезических приборов. После этого, в 1982 году, отечественная система ГЛОНАСС начала формироваться с запуска трех спутников. В это же время в Массачусетском институте была сформирована группа под руководством Чарльза Кунселмана. Эта группа провела испытания прототипа приемника Macrometr [72]. Необходимо отметить, что задатки спутниковой геодезии появились еще в 1768 году [73, 74]. Иоган Альбрехт Эйлер впервые разработал теорию определения параметров земного эллипсоида по одновременным измерениям зенитных расстояний Луны на ряде пунктов земной поверхности, лежащих на одном меридиане и имеющих известные астрономические координаты. Он также оценил достоинства и недостатки своего метода и отметил, что этот метод не дает надежных результатов из-за большой удаленности Луны от Земли. Несмотря на это работа Эйлера содержала элементы геометрических

методов спутниковой геодезии и показывала преимущества наблюдений околоземных небесных тел для решения научных задач геодезии.

На сегодня космический сегмент системы GPS составляет 24 спутника. Их орбиты развёрнуты друг относительно друга в экваториальной плоскости на 60 градусов, имеют наклон 55 градусов и находятся на средней высоте 20-200 км. Средняя продолжительность жизни спутника 7,5 лет. Космический сегмент системы ГЛОНАСС также составляет 24 спутника, орбиты которых, находятся на высоте 18 800 - 19 100 м с наклоном орбиты 64.9 градуса [72].

Кроме систем GPS и GLONASS существуют также система Евросоюза – Galileo и Китайская навигационная система – Beidou.

Galileo – навигационная система, которая начала разрабатываться по инициативе Европейского Союза и Европейского Космического Агентства в 2003 г. В отличие от GPS, систему навигации Galileo предполагается использовать сугубо в коммерческих целях.

Первый экспериментальный спутник европейской навигационной системы Galileo, названный GIOVE-A (GIOVE – это аббревиатура от Galileo In-Orbit Validation Element) был запущен на орбиту высотой около 23 км и углом наклона 56° с космодрома Байконур российской ракетой-носителем «Союз ФГ» 28 декабря 2005 г.

Работы по созданию Китайской навигационной системы Beidou были начаты в 2000 г., в 2007 г. был выведен на орбиту первый спутник Beidou, в переводе с китайского – «большая медведица», гражданскому потребителю она сможет предложить определение местоположения с точностью до 10 м, измерение скорости до 0,2 м/с. На данный момент орбитальная группировка Beidou введена в эксплуатацию частично, спутники охватывают территорию Китая и сопредельных территорий.

Сегодня методы спутниковой геодезии активно применяются в маркшейдерии, геодинاميке, а также для мониторинга устойчивости бортов карьеров. Очень активно развивается рынок оборудования и программного обеспечения. Лидерами в этой отрасли являются фирмы Leica (Швейцария),

Trimble (США) и Topcon (Япония). На Российском рынке оборудования также присутствуют фирмы Ashtech, Garmin, Magellan (США), Geotronics (Швеция), Карл Цейс (Германия).

Спутники систем GPS и ГЛОНАСС непрерывно передают сигналы, содержащие информацию об их положении и точном времени, а также дальномерные коды, позволяющие измерять расстояния. Определение координат пользователя производится с помощью спутниковых приемников, которые измеряют либо время прохождения сигнала от нескольких спутников до приемника, либо фазу сигнала на несущей частоте [75].

Первое применение системы GPS для изучения современной геодинамики было осуществлено в 1991 г. на Кавказе сотрудниками Института физики Земли АН СССР, Индианского университета США и Массачусетского технологического института. Мотивом для постановки этих работ послужило Рачинское землетрясение, произошедшее в апреле 1991 г. в Они-Джавском районе Грузии [76]. Анализ отечественных источников показывает, что подобные системы применяются на месторождении алмазов им. В. Гриба [77], на медно-колчеданном месторождении Юбилейное [78], на золоторудном месторождении Олимпиадинского ГОКа [79], а также в карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК» [80] и других зарубежных месторождениях и месторождениях России.

Следующим витком эволюции измерительных приборов стало внедрение в практику мониторинга средств площадной съемки, таких как наземные лазерные сканеры (НЛС) и радарные установки.

Лазерное сканирование - это метод, позволяющий создать цифровую модель объекта исследования, представив его набором точек с пространственными координатами. Несмотря на принципиальную новизну данного метода его можно рассматривать как логическое продолжение развития безотражательных технологий и их использования в геодезических инструментах. Полученная в результате измерений цифровая модель объекта представляет собой набор от сотен тысяч до нескольких миллионов точек, имеющих пространственные координаты с точностью в несколько миллиметров. Кроме этого, в большинстве

современных сканеров имеется встроенная цифровая камера, позволяющая для каждой точки трехмерного растрового изображения определить показатели интенсивности отражения и истинного цвета, которые на этапе камеральной обработки используются не только для трансформации растрового изображения в векторный формат, но и для изучения геологического строения объекта [81].

В сущности, метод наземного лазерного сканирования достаточно схож с методикой измерения расстояний с помощью электронного тахеометра и заключается в измерении расстояний от сканера (тахеометра) до точек объекта и регистрации соответствующих вертикальных и горизонтальных углов. Однако принцип тотальной съемки объекта, а не его отдельных точек, характеризует НЛС как съемочную систему, результатом работы которой является трехмерное изображение, так называемый скан [81].

Основными структурными элементами НЛС являются (Рисунок 2.1):

- дальномерный блок. Функция данного блока заключается в измерении расстояний до препятствий, находящихся на пути приемо-передающего тракта дальномера. В качестве источника излучения используется полупроводниковый лазер. Расстояние может определяться как по времени прохождения (импульсный метод), так и по сдвигу фазы (фазовый метод) отраженного сигнала;
- оптико-механический блок развертки лазера (блок развертки). Функциями блока развертки являются смещение приемо-передающего тракта дальномера и фиксирование углов направленности излучения с помощью оптико-механической системы, состоящей из зеркальных призм и сервоприводов. Вертикальная развертка осуществляется с помощью плоской либо многогранной зеркальной призмы, а горизонтальная развертка, в большинстве случаев, осуществляется путем разворота блока развертки вокруг оси Z. Смещение приемо-передающего тракта дальномера осуществляется в пошаговом или непрерывном режимах;
- канал передачи данных на управляющий компьютер. Данные измерений, выполняемых НЛС, обрабатываются с помощью встроенного микропроцессора, после чего в реальном времени передаются при помощи проводного или

беспроводного соединения на управляющий компьютер со специализированным программным обеспечением (ПО). Таким же образом осуществляется обратная связь с НЛС [82].

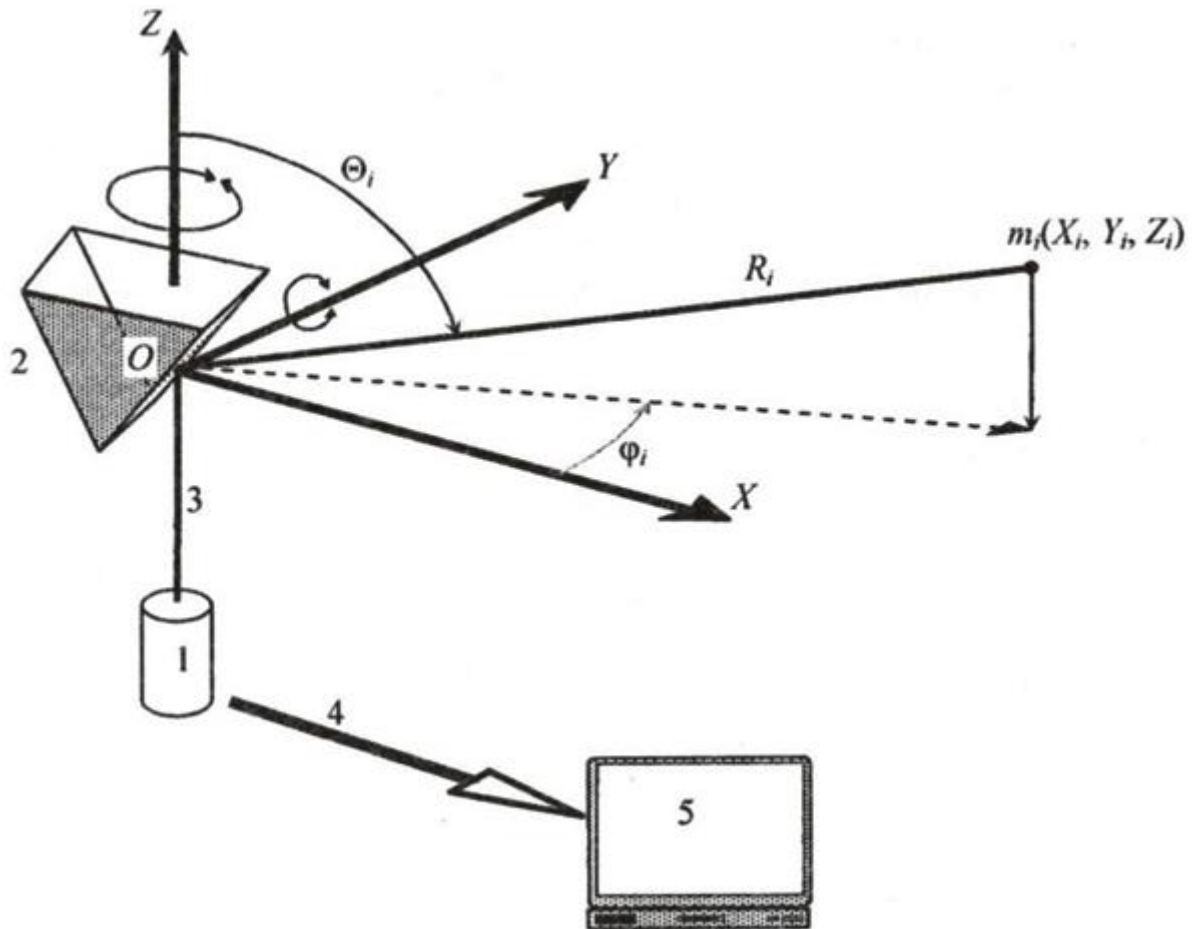


Рисунок 2.1 - Основные элементы конструкции наземного лазерного сканера [81]:

- 1 - дальномерный блок; 2 - оптико-механический блок развертки лазера; 3 - приемопередающий тракт дальномера; 4 - канал передачи данных на управляющий компьютер; 5 - управляющий компьютер, m_i - точка отражения лазерного излучения; X, Y, Z - оси системы координат НЛС; φ_i - измеренный горизонтальный угол на точку отражения m_i ; θ_i - измеренный вертикальный угол на точку отражения m_i ; R_i - расстояние, измеренное до точки отражения m_i

В настоящее время в мире наблюдается бурный рост производства лазерно-сканирующих систем. Среди основных производителей можно выделить следующие фирмы: «LeicaGeosystems» (Швейцария), «Riegl» (Австрия), «Trimble» - США, «ZOLLER+FROHLICH GmbH» (Германия), «MENSIS» (Франция), «OPTECH» (Канада) [82]. Они выпускают лазерные сканеры,

отличающиеся дальностью действия, углами съемки, разрешением, точностью и т.д.

В научной литературе встречается довольно большое количество примеров использования технологии НЛС. Очень часто эти технологии применяют в качестве средства картирования и изучения геологических структур, а также для создания цифровой модели рельефа (ЦМР). Например, на Шипуновском месторождении известняков сканер использовали для создания объемной цифровой модели и определения на ее основе структурно-иерархического строения геоблоков [83]. На карьере Северный ОАО «ЕВРАЗ КГОК» метод НЛС применялся для исследования трещиноватости массивов горных пород [84], и другие примеры [85, 86].

Технологии НЛС также часто применяют для наблюдения за оползневыми процессами. Например, в статье [87] автор приводит обзор зарубежных публикаций и описывает примеры использования этой технологии для изучения крупных оползней в городе Пишотта (Италия), в Пуэрто-Рико, в городе Сешильенн (Франция) и другие.

Но существуют примеры использования НЛС и как средство мониторинга бортов карьеров, например, на Сибайском и Учалинском карьере [88]. В источнике [89] указывается о применении НЛС при мониторинге Султановского карьера. В статье [90] приводятся результаты мониторинга бортов карьера Нюрбинский.

Несмотря на все удобство использования лазерных сканеров самой удачной и эффективной технологической новинкой стало внедрение в практику мониторинга устойчивости бортов карьеров радарных технологий.

Слова радар или radar на английском языке является аббревиатурой от «Radio Detection and Ranging», что переводится как «радиообнаружение и определение дальности».

В 1886 г. немецкий физик Генрих Герц обнаружил, что радиоволны способны отражаться металлическими и диэлектрическими телами, а в 1897 году,

работая с радиопередатчиком, Попов открыл, что радиоволны отражаются от металлических частей кораблей и их корпуса [91].

Впервые идея радара пришла в голову немецкому изобретателю Кристиану Хюльсмайеру, который в 1905 году получил патент на устройство, в котором эффект отражения радиоволн использовался для обнаружения кораблей. В патенте, выданном в 1906 году, Хюльсмайер описал способ определения расстояния до отражающего объекта [91].

В наше время радары нашли применение во многих областях деятельности человека, например, измерение поверхностных волн океана, управление воздушным движением, метеорологическое обнаружение осадков, а также в горном деле для мониторинга устойчивости бортов и уступов карьеров.

В 2002 году в Университете Квинсленда (Австралия), группа исследователей разработала сканирующую радиолокационную систему для мониторинга устойчивости бортов карьеров с использованием дифференциальной интерферометрии. Система, известная как Slope Stability Radar (SSR), использует радиолокатор с шириной луча 2° для сканирования наклона по вертикали (высота) и горизонтальное (азимутальное) направление. Сканирование со скоростью 10° в секунду в диапазоне $\pm 60^\circ$ по вертикали и 340° по горизонтали.

Производителями радаров, на сегодняшний день, являются 3 фирмы: Reutech Mining (ЮАР), Ground Probe (Австралия) и IDS (Италия). Кроме того, в настоящее время внедряются разработки радаров из Китая.

Принцип проведения измерений радаром отличается от принципов, используемых в традиционном маркшейдерском оборудовании. Измерения, выполняемые радаром, основаны на использовании эффекта наложения (интерференции) электромагнитных волн.

Радар является активным датчиком и посылает импульс с частотой 17,1–17,3 ГГц. Импульс взаимодействует с отражающей поверхностью, частично поглощается и частично отражается в сторону радара. Интерферометрический анализ позволяет получить данные о смещении объекта путем сравнения информации, собранной в разное время, о сдвиге фаз отраженного от объекта

сигнала (Рисунок 2.2). Величина смещения прямо пропорциональна величине разности фаз [92].

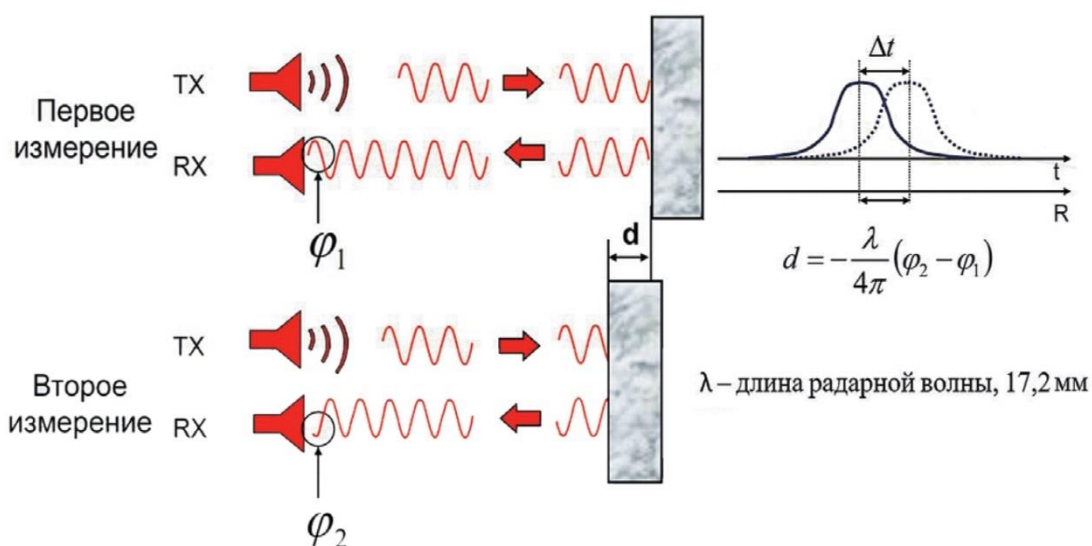


Рисунок 2.2 – Принцип работы радарной системы [92]

На рисунке 2.2 φ_1 и φ_2 – величины фаз до смещения и после смещения соответственно, d – зафиксированное смещение.

Путем сопоставления фаз определяется величина смещения. Стоит отметить, что данная величина определяется в направлении линии визирования, т.е. фактически производится измерение не общего вектора смещения, а его компоненты (Рисунок 2.3) [92].

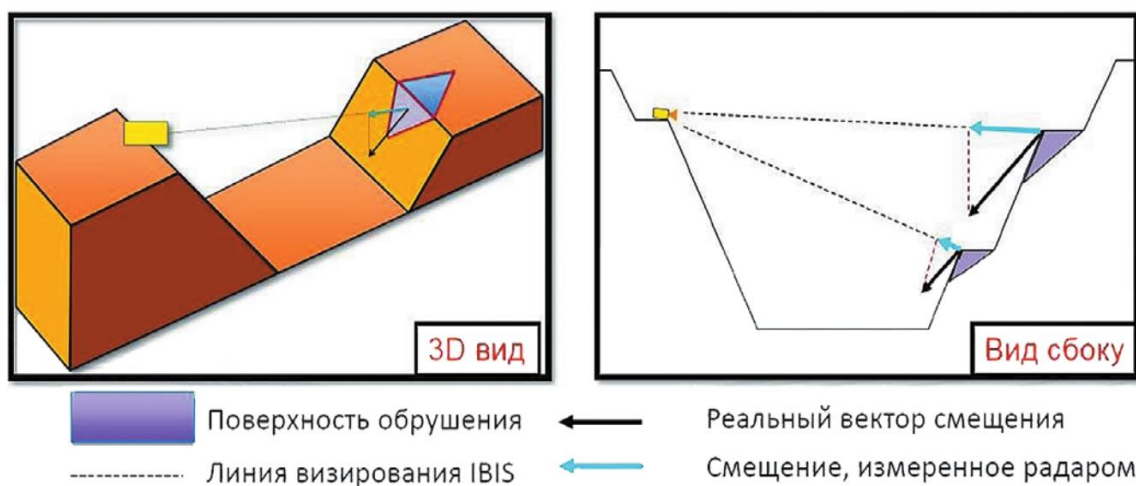


Рисунок 2.3 – Определение смещений радаром [92]

Все существующие инструменты делятся на радары с реальной апертурой и синтезированной апертурой. Вид апертуры определяется видом антенны инструмента. У радара с реальной апертурой присутствует антенна, имеющая параболический или линейный вид (Рисунок 2.4, 2.5).

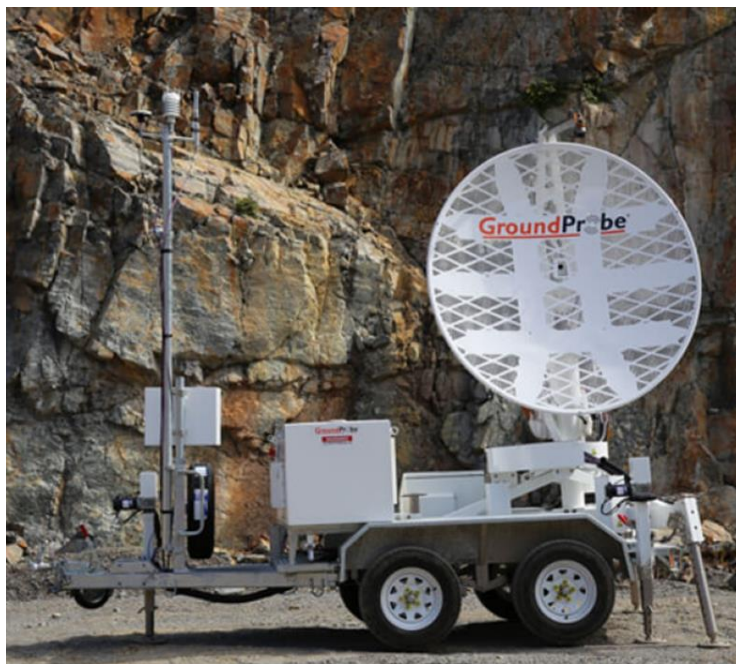


Рисунок 2.4 - 3D-радар с реальной апертурой SSR-XT [93]



Рисунок 2.5 - 2D-радар с реальной апертурой SSR-FX [93]

У радаров с синтезированной апертурой (то есть полученной искусственно) за ширину антенны принимается длина направляющей рельсы, по которой перемещается инструмент (рисунок 2.6, 2.7).



Рисунок 2.6 - Радар IBIS-FM с синтезированной апертурой [94]



Рисунок 2.7 - Радар IBIS ArcSAR с синтезированной апертурой [94]

Во время каждого измерения отражение радарного сигнала принимается от каждого пикселя. Это отражение дает информацию об амплитуде сигнала и фазе. Чем меньше размер пикселя, наложенного на модель объекта, тем более детально можно наблюдать за массивом горных пород. Зачастую радары с синтезированной апертурой имеют размер пикселя меньше, чем радары с реальной апертурой и способны производить съемку с больших расстояний до объекта мониторинга.

С момента выпуска первого радара прошло больше 20 лет и на сегодняшний день они активно применяются на многих зарубежных месторождениях. Например, на золотом руднике «Geita» (Танзания) [95], в карьере «Palabora» (Южная Африка) [96], в «Siilinjärvi» (Финляндия), «Sadiola Gold mine» (Мали) и «Jwaneng Diamond mine» (Ботсвана) [97], «Kanmantoo Copper Mine» (Австралия) [98] «Bingham-Canyon» (США) и многие другие. Одно из самых крупных обрушений, произошедшем в «Bingham-Canyon» (Рисунок 2.8) было спрогнозировано при помощи радаров IDS и GroundProbe.



Рисунок 2.8 – Обрушение в карьере «Бингам Каньон» (США) [99]

В России первый радар появился в 2014 году в карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК». Это радар IBIS FM с синтезированной апертурой [100-105] фирмы IDS в контейнерном исполнении (рисунок 2.9). Дальность действия от 10 до 4000 метров. Размер пикселя 4,4 м на 0,75 м (при удалении на 1000 м) и 8,8 м на 0,75 м (при удалении на 2000 м). Рабочие температуры окружающей среды в контейнерном исполнении от -50° до $+55^{\circ}$ [106]. Время одного полного сканирования составляет 2 минуты, а точность проведения измерений 0,1 мм (по данным производителя оборудования) На сегодняшний день в карьере «Железный» работает целая система радарного мониторинга, состоящая из 4 радаров IBIS (1 стационарный радар и 3 мобильных).



Рисунок 2.9 – Радар IBIS FM в карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК»

К настоящему времени применение радаров для мониторинга устойчивости бортов карьеров в России и странах СНГ все больше набирает обороты, однако уже сейчас можно сказать, что данная технология обладает рядом преимуществ перед другими методами мониторинга. Основным преимуществом является их способность проводить измерения 24 часа в сутки в любую погоду, невзирая на осадки (снег, дождь, град, туман) или плохую видимость в карьере, вызванную

пылью, выхлопными газами и т.п. Программное обеспечение радара способно за короткое время проанализировать данные измерений и при необходимости выдать предупреждение об эвакуации персонала. Кроме того, заявленная производителями точность измерения (0,1 мм) выше, чем у любого геодезического метода мониторинга.

В настоящей работе будут приведены данные радарного мониторинга об обрушениях в карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК».

2.2 Анализ изменения кинематических параметров обрушений массивов прочных скальных пород

Как указывалось, выше под кинематическими параметрами обрушения массивов горных пород понимают смещение, скорость и ускорение характерных точек разрушающихся объектов.

Были собраны и проанализированы данные о случаях обрушений в карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК» за период с 2014 по 2023 г.г.. Всего выбрано 22 случая потери устойчивости, которые являются задокументированными сотрудниками Геомеханической службы АО «Ковдорский ГОК» и по всем этим случаям есть данные радарного мониторинга, о смещениях, скоростях и ускорениях. В таблице 2.1 приведены данные проанализированных обрушений.

Таблица 2.1 - Сводная таблица данных о проанализированных случаях потери устойчивости в карьере «Железный»

№	Дата	Участок	Документ о фиксации события	Объем обрушения, м ³
1	19.11.22	+310 +238 Ю	Паспорт деформации № 30	30 000
2	28.09.22	+130 +70 СВ	Паспорт деформации № 29	5 000
3	31.05.22	+258 +202 В	Паспорт деформации № 28	130 000
4	30.04.21	+322 +262 Ю	Паспорт деформации № 27	30 000

Продолжение таблицы 2.1

5	14.10.2020	+40 -35	Паспорт деформаций №26	6 000
6	27.08.2020	+10 -20 Ю	Паспорт деформаций № 25	6 000
7	24.08.2015	+70 -35 В	Паспорт деформаций № 21	180 000
8	11.02.2023	+226 ЮВ	Акт обследования +226 ЮВ	-
9	05.11.2022	+10 -20 ЮЗ	Акт обследования +10 -20 ЮЗ	-
10	22.10.2022	+250 +310 Ю	Акт обследования +250 +310 Ю	-
11	19.09.2022	+166 +290 ЮЗ	Акт обследования +166 +290 ЮЗ	-
12	07.09.2022	+82 +142 З	Акт обследования +82 +142 З	-
13	07.08.2022	+130 -50 В	Акт обследования +130 -50 В	-
14	28.07.2022	+130 +10 СВ	Акт обследования +130 +10 СВ	-
15	22.07.2022	+10 -50 СВ	Акт обследования +10 -50 СВ	-
16	30.01.22	-35 -125 ЮВ	Акт обследования -35 -125 ЮВ	-
17	27.12.2021	+190 +290 ЮЗ	Акт обследования +190 +290 ЮЗ	-
18	17.10.2018	Восточный участок борта	-	-
19	16.10.2018	-	-	Около 100
20	08.10.2018	+70 +40 В	-	Около 100
21	01.10.2014	+10 -20 В	-	500
22	30.05.2023	-50 -130 ЮВ	Акт обследования -50 -130	

В таблице выбран следующий порядок: сначала представлены крупные обрушения, которые занесены в Паспорта деформаций (события объемом от 5 000 м³), потом случаи, задокументированные в актах обследования (здесь нет данных об объемах обрушившейся породы, но обычно эти случаи представляют собой осыпание горной массы от 500 до 1000 м³) и еще несколько зафиксированных обрушений в период, когда система внедрялась в работу службы, но не были выработаны механизмы документирования. Кроме того, в момент формирования данной работы произошло еще одно обрушение и, чтобы не менять нумерацию, оно было внесено в таблицу под номером 22 от 30.05.2023 г.

Целью анализа кинематических параметров является установление параметра, по которому будет осуществляться дальнейших прогноз состояния массива. Для удобства дальнейшего анализа и описания каждому случаю присвоен порядковый номер.

2.2.1 Изменение кинематического параметра «смещение» во времени

В 1987 году институтом ВНИМИ были выпущены «Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости» [36]. Методические указания содержали рекомендации по созданию наблюдательных сетей и закладке наблюдательных станций, схемы и методика наблюдений за деформациями бортов карьеров, обоснования точности и периодичности наблюдений, методика обработки и интерпретации результатов наблюдений, а также вопросы оценки устойчивости бортов карьеров по наблюдаемым деформациям. Основой для написания методических указаний послужил опыт наблюдений за развитием оползней на угольных и рудных месторождениях.

Согласно пункту 6.3.1 этих методических указаний общая величина смещения поверхности прибортового массива зависит не только от степени устойчивости бортов карьера, типа развивающегося оползня, но и от параметров бортов и, прежде всего, от их высоты.

Долговременными наблюдениями за деформациями бортов карьеров в натурных условиях и моделированием откосов эквивалентными материалами установлена зависимость деформирования прибортового массива от степени устойчивости бортов, характеризующаяся следующими признаками.

1) При коэффициенте запаса устойчивости бортов равном и более 1,3, прибортовой массив испытывает преимущественно упругие деформации, величина которых находится в пределах точности маркшейдерских измерений; относительные горизонтальные деформации массива при этом не превышают 1×10^{-3} .

2) При коэффициенте запаса устойчивости бортов 1,3—1,2 наблюдают затухающие во времени смещения, в массиве появляются микро- и макротрещины; общие смещения поверхности прибортовых массивов глубоких карьеров (с бортами высотой 100 м и более) достигают 200—300 мм и более.

3) При коэффициенте запаса устойчивости бортов 1,2—1,1 прибортовой массив испытывает значительные деформации: на поверхности, примыкающей к борту, появляются видимые заколы и трещины, горизонтальные деформации прибортовых массивов достигают порядка $(10-30) \times 10^{-3}$, а общие величины смещений массива в пределах призмы оползания глубоких карьеров достигают 1,5—2 м и более (в зависимости от высоты борта и его геологического строения); деформации во времени преимущественно также затухают.

4) При уменьшении коэффициента устойчивости бортов до 1,05 и менее со временем наблюдали разрушения бортов.

5) При крутых углах падения слоев слоистого прибортового массива трещины и заколы на бортах карьеров с раскрытием до 0,5—1 м вследствие изгиба и проскальзывания слоев возникают значительно раньше при коэффициенте запаса устойчивости, обеспечивающем общую устойчивость борта. Общие смещения прибортового массива, предшествующие обрушению бортов глубоких карьеров, достигают весьма значительных величин (5—10 м).

Для того, чтобы оценить возможность применения данного параметра в качестве критерия оценки состояния массива в условиях высокопрочных горных пород на рисунках 2.10 (№1 в таблице 2.1), 2.11 (№5 в таблице 2.1), 2.12 (№9 в таблице 2.1) приведены графики смещений случаев потери устойчивости участков борта карьера «Железный» с указанием момента обрушения.

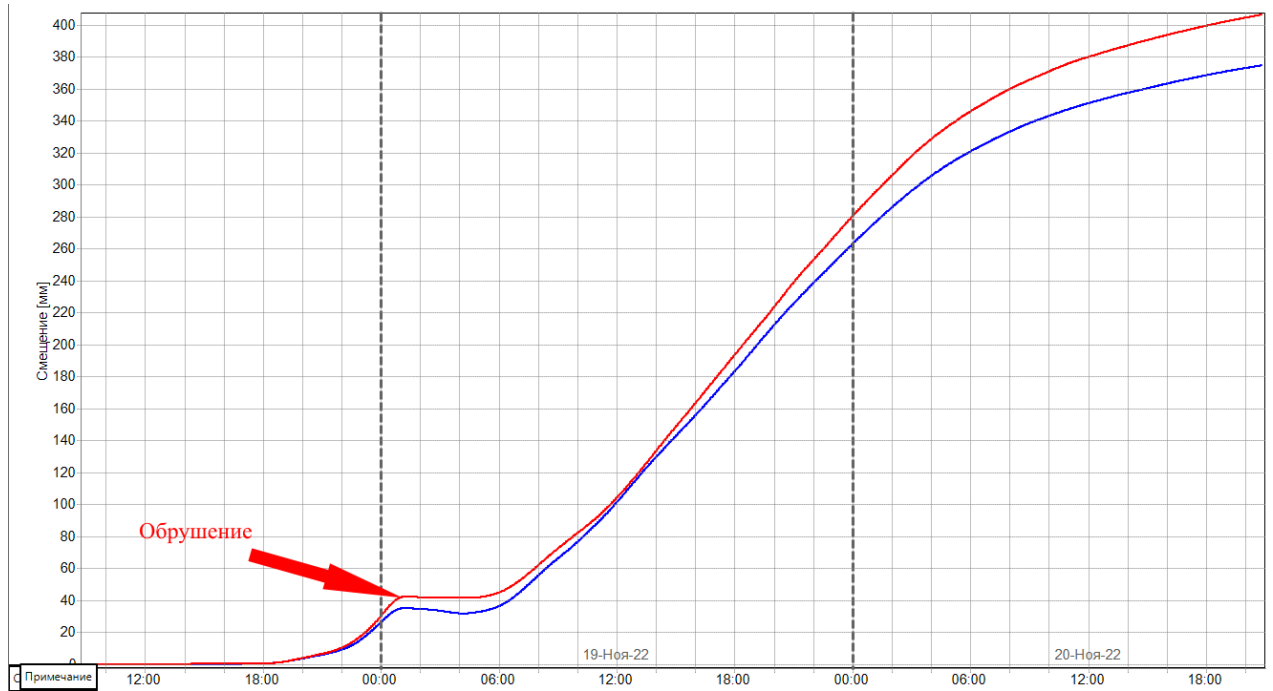


Рисунок 2.10 – График смещения при обрушении №1 в таблице 2.1

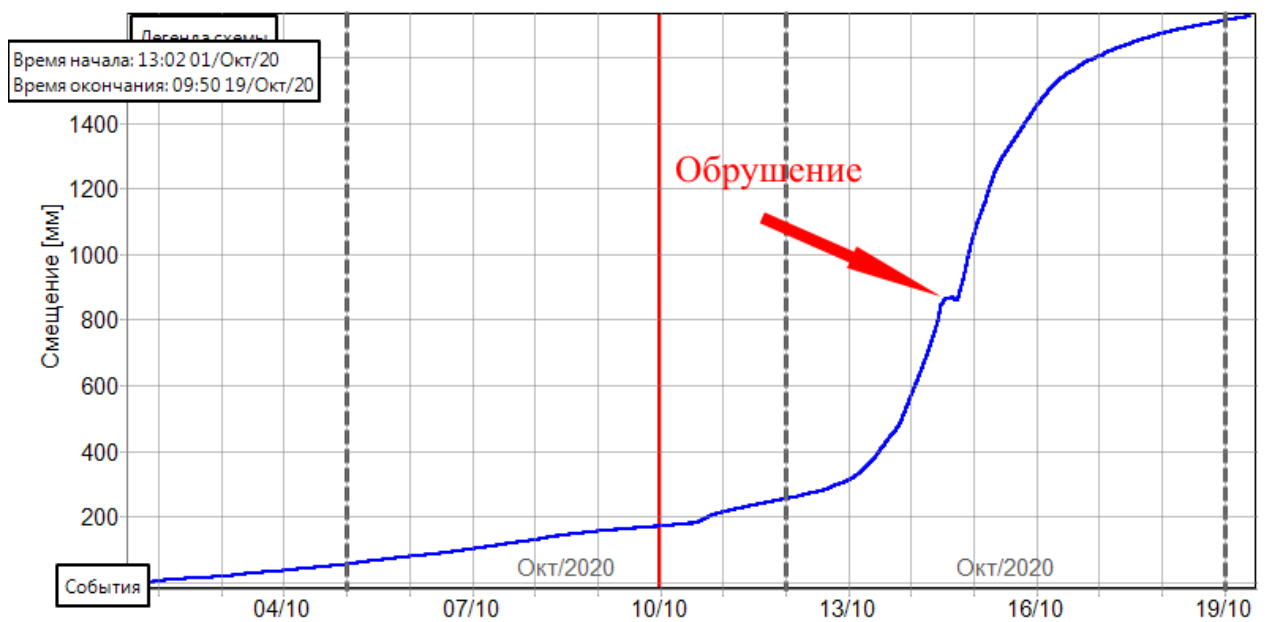


Рисунок 2.11 – График смещения при обрушении №5 в таблице 2.1

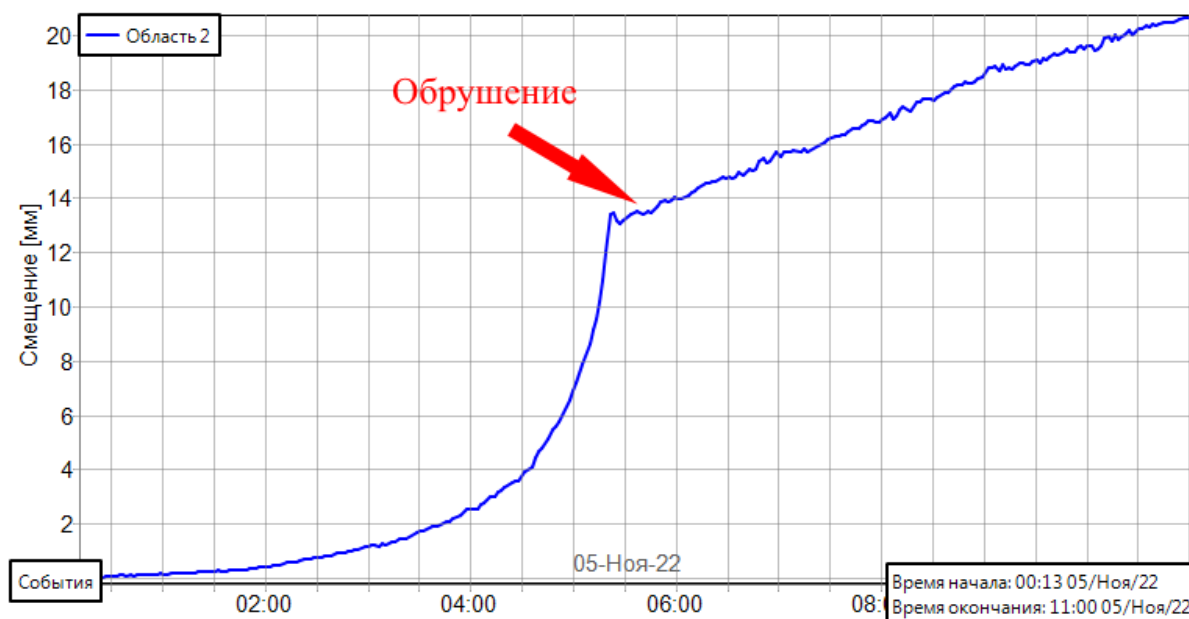


Рисунок 2.12 – График смещения при обрушении №9 в таблице 2.1

Из представленных графиков можно сделать вывод, что спрогнозировать состояние массива достаточно проблематично, кроме того, на графиках трудно определить момент обрушения, т.к. отсутствуют ярко выраженные максимальные значения этого параметра. Это можно объяснить зафиксированными осыпаниями горной массы различной интенсивности, как до обрушения, так и после.

Для всех выбранных случаев обрушения участков массива горных пород были определены предельные значения смещений и помещены в таблицу 2.2. В данном случае под предельными значениями смещений понимается максимальное накопленное смещение участка борта, после которого произошел фактический отрыв породы от массива.

Таблица 2.2 - Предельные значения смещений всех выбранных случаев обрушения участков массива горных пород

№ обрушения	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Смещение, мм	42	331	215	45	880	91	51	69	13

Продолжение таблицы 2.2

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
70	17	40	140	30	18	400	550	250	42	21	5	380

Из таблицы 2.2 следует, что разброс предельных смещений варьируется в достаточно большом диапазоне от 5 мм (событие № 21) до 880 мм (событие № 5). Подобный разброс можно объяснить различными свойствами горных пород, слагающих данные участки, а также наличие (или отсутствие) структурных неоднородностей в массиве.

Так как для 10 из 22 случаев потери устойчивости имеется информация об объемах обрушившейся горной массы, то появляется возможность сопоставить данные предельных смещений с объемами обрушений. На рисунке 2.13 показана диаграмма, где по оси абсцисс указываются объем обрушений, а по оси ординат зафиксированное предельное смещение.

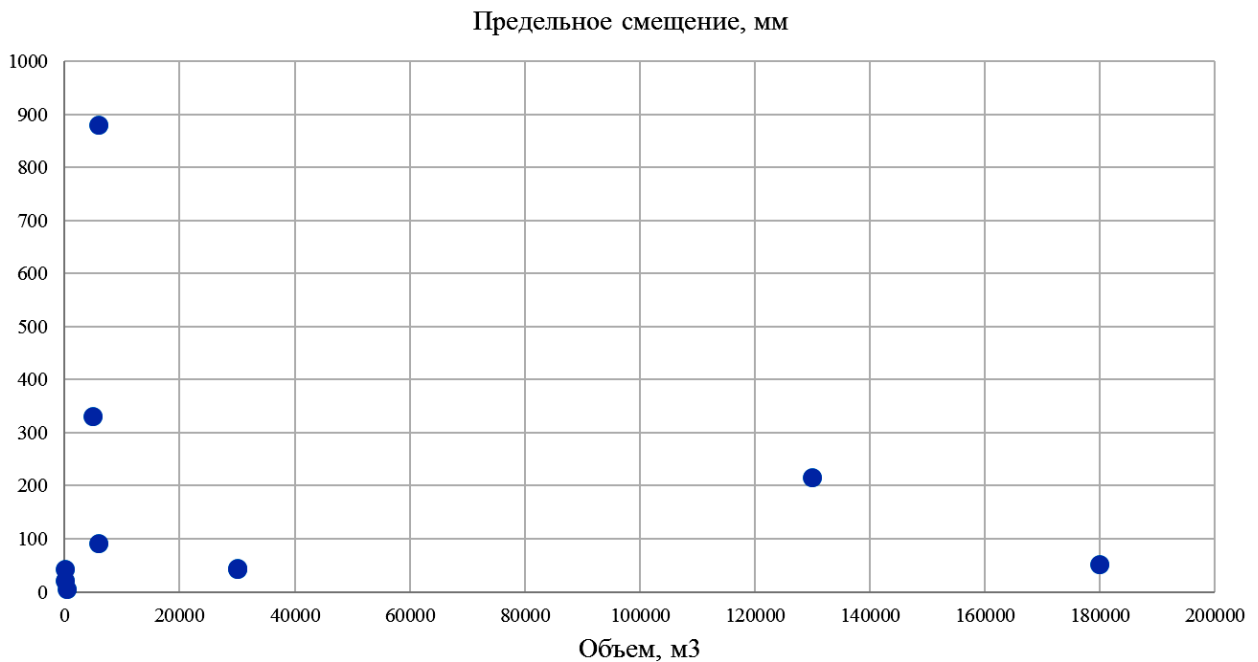


Рисунок 2.13 - Диаграмма зависимости предельного смещения от объемов обрушившейся горной массы

Из диаграммы следует, что для условий Ковдорского месторождения нет зависимости между объемами обрушающейся горной массы и предельными значениями смещений. Кроме того, опираясь на графики смещений, невозможно определить на каком этапе находится процесс разрушения, т.к. нет ярко выраженной точки максимума, следовательно, данный параметр не подходит для оценки состояния массива.

2.2.2 Изменение кинематического параметра «скорость смещения» во времени

Данный параметр используется также как и смещение с момента, когда начали выполнять геодезические наблюдения за деформациями бортов карьеров. Скорость смещения массива является производной координаты точки или координаты центра массы горной породы по времени:

$$V_x = \frac{dx}{dt} \quad (4)$$

$$V_y = \frac{dy}{dt} \quad (5)$$

$$V_z = \frac{dz}{dt} \quad (6)$$

При обработке радарных измерений, которые выполняются в специализированном программном обеспечении (в данном случае программный комплекс Guardian), скорость высчитывается по формуле:

$$V = \frac{(d_2 - d_1)}{T} \quad (7)$$

где d_1 и d_2 – соответственно первое и второе измеренное смещение, T – период времени, между измерениями.

Особенностью такого пересчета является период T . Так как время между двумя радарными измерениями равно 2 минуты, то в расчетах за период T принимается как раз это время, однако учитывая выбранные единицы измерения мм/ч при расчете скорости программа умножает полученный результат на 30, чтобы соответствовать выбранной единице измерения. В итоге, после расчетов, график скорости смещения выглядит как на рисунке 2.14.

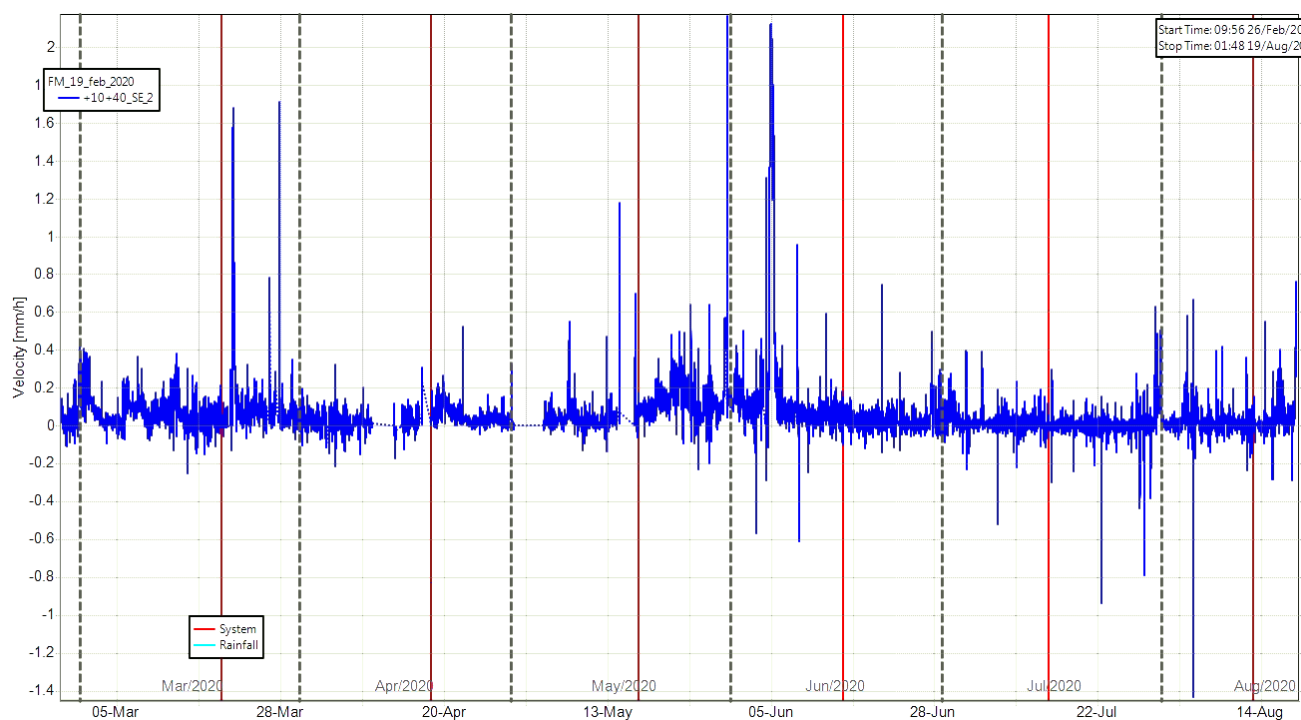


Рисунок 2.14 – Пример графика скорости смещения без сглаживания

Анализировать подобные графики достаточно проблематично. Для того, чтобы провести анализ в программе, существует функция сглаживания графиков. Данная функция подразумевает математическое увеличение периода времени между измерениями. Например, предположим, что радар выполнял съемку 12 часов с периодичностью 1 раз в 2 минуты и выполнил 360 измерений. При расчете скорости мы поставим период 1 час. Программа будет рассчитывать скорость следующим образом:

$$1 \text{ расчет } V_1 = \frac{(d_{30} - d_1)}{1};$$

$$2 \text{ расчет } V_2 = \frac{(d_{31} - d_2)}{1};$$

$$3 \text{ расчет } V_3 = \frac{(d_{32} - d_3)}{1} \text{ и т.д.}$$

Для того, чтобы оценить возможность применения данного параметра в качестве критерия оценки состояния массива в условиях высокопрочных горных пород, на рисунках 2.15 (№1 в таблице 2.1), 2.16 (№5 в таблице 2.1), 2.17 (№9 в таблице 2.1) приведены графики скорости смещений случаев потери устойчивости участков борта карьера «Железный» с указанием момента

обрушения. Кроме того, в таблицу 2.3 занесены предельные скорости смещения массива, т.е. зафиксированные непосредственно перед отрывом горной массы от массива для всех обрушений.

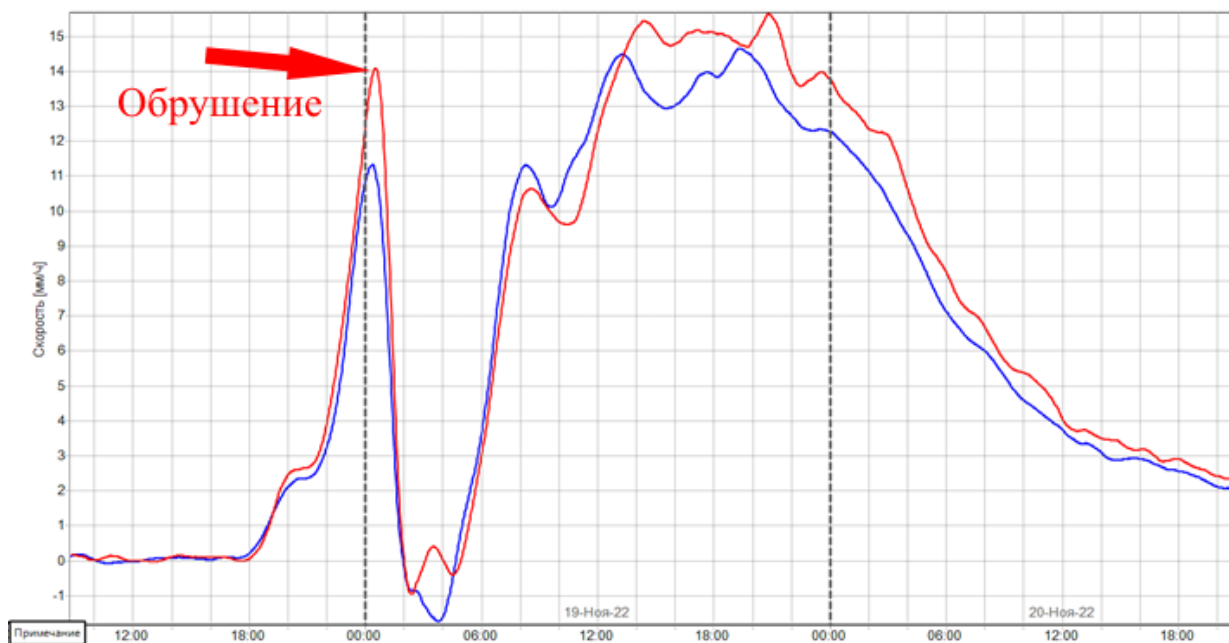


Рисунок 2.15 – График скорости смещения при обрушении №1 в таблице 2.1



Рисунок 2.16 – График скорости смещения при обрушении №5 в таблице 2.1

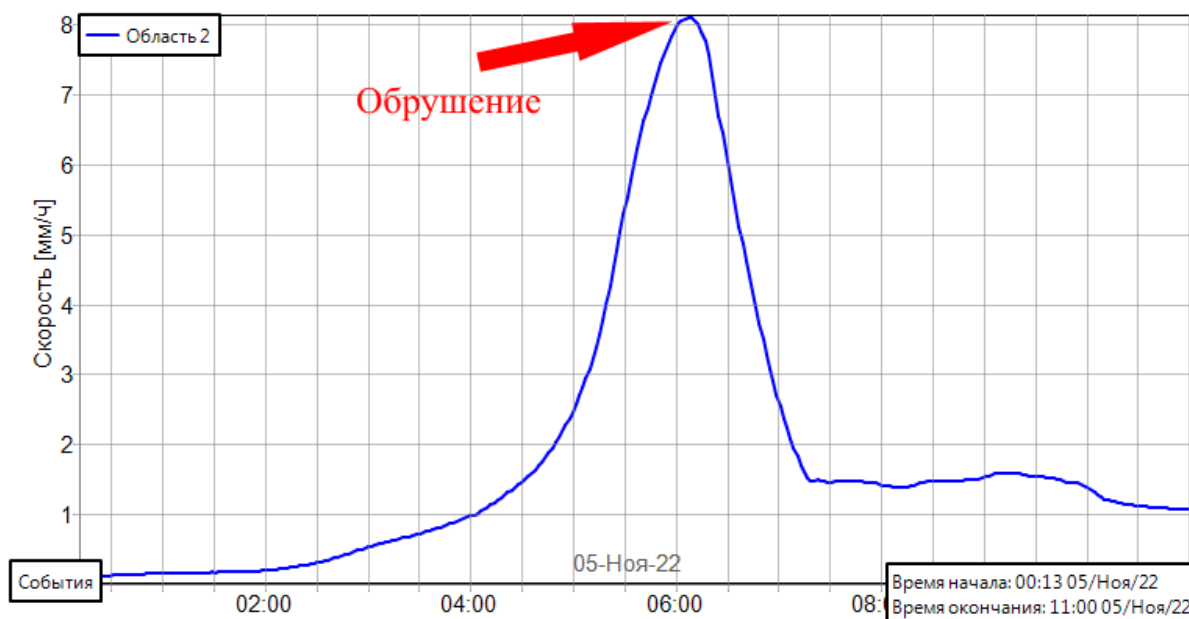


Рисунок 2.17 – График скорости смещения при обрушении №9 в таблице 2.1

Таблица 2.3 - Предельные значения скорости смещений всех выбранных случаев обрушения участков массива горных пород

№ обрушения	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Скорость смещения, мм/ч	14	20	5	14	35	10	20*	8	8

Продолжение таблицы 2.3

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
12	5	8	8	21	6,5	30	25	16	14	8	1,6*	29

* - для этих двух обрушений скорость высчитывалась вручную, а не с помощью программы, поэтому могут быть погрешности, в особенности для обрушения №21, которое было незначительным и одним из первых.

Из графиков на рисунках 2.15, 2.16, 2.17 видно, что обрушение происходило при ярко выраженном максимальном значении скорости смещения массива, а значит, используя данный параметр, можно спрогнозировать возможное обрушение.

Анализируя данные таблицы 2.3 можно сделать вывод, что предельные значения скорости также как и предельные значения смещений существенно отличаются друг от друга. Минимальное зафиксированное предельное значение скорости – 5 мм/ч (значения для обрушения под №21 не будем принимать в

расчет), а максимальное 35 мм/ч. Также как и с параметром «смещение» сопоставим данные о скоростях с объемами обрушений (Рисунок 2.18).

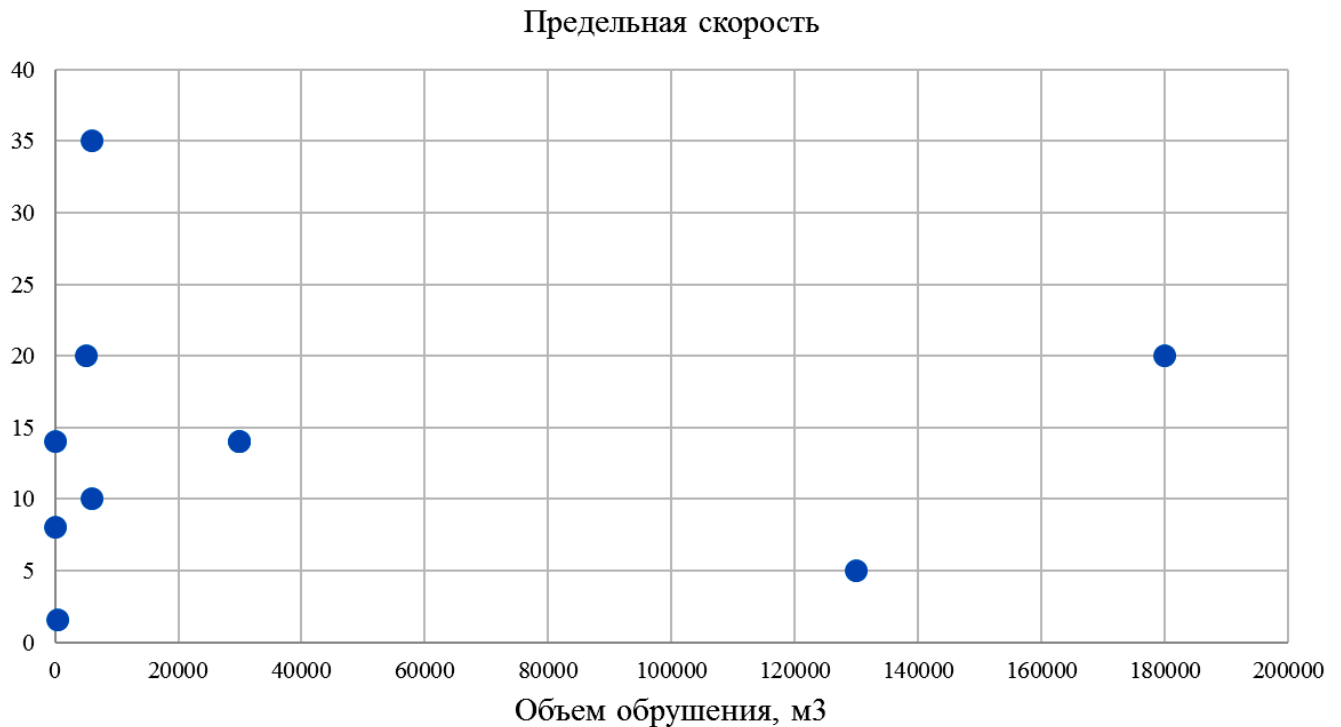


Рисунок 2.18 - Диаграмма зависимости предельной скорости смещения от объемов обрушившейся горной массы

Из диаграммы следует, что для условий Ковдорского месторождения нет зависимости между объемами обрушающейся горной массы и предельными значениями скорости смещения. Однако данный кинематический параметр возможно применять при прогнозе вероятного обрушения.

2.2.3 Изменение кинематического параметра «ускорение скорости смещения во времени»

Ускорение скорости смещения массива является второй производной координаты точки или координаты центра массы горной породы по времени:

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dV_x}{dt} \quad (8)$$

$$a_y = \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{dV_y}{dt} \quad (9)$$

$$a_z = \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{dV_z}{dt} \quad (10)$$

При обработке радарных измерений в специализированном программном обеспечении ускорение скорости рассчитывается по формуле:

$$a = \frac{(V_2 - V_1)}{T} \quad (11)$$

где V_1 и V_2 – соответственно рассчитанные скорости смещения, T – период времени, между измерениями.

Основным недостатком кинематического параметра «ускорение скорости смещения» является слишком резкое возрастание и падение графиков в отличие от графиков скорости, где возрастание происходит плавно. На рисунках 2.19 (обрушение № 10), 2.20 (обрушение № 11), 2.21 (обрушение № 17) показан пример графиков этого кинематического параметра.



Рисунок 2.19 – График ускорения скорости смещения при обрушении №10 в таблице 2.1

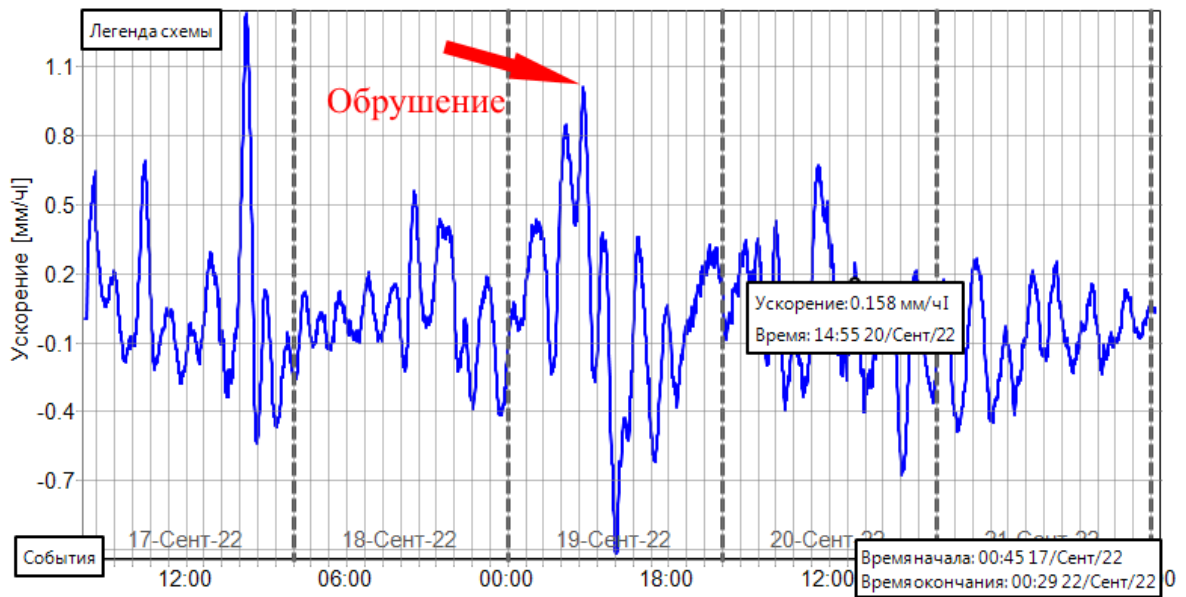


Рисунок 2.20 – График ускорения скорости смещения при обрушении №11 в таблице 2.1



Рисунок 2.21 – График ускорения скорости смещения при обрушении №17 в таблице 2.1

Параметр «ускорение скорости смещения» резко реагирует на незначительные изменения скорости, кроме того, данный параметр может иметь и отрицательные значения в случаях уменьшения скорости смещения массива. Все вышеуказанное значительно затрудняет анализ данных и прогноз состояния массива. К тому же, как показано на графиках рисунков 2.19, 2.20, 2.21, момент обрушения ни характеризуется максимальным значением ускорения, как в случае с графиками скорости.

Выводы к главе 2

Для наблюдений за состоянием массива до обрушения и вовремя активной стадии одним из самых эффективных методов до сих пор является применение геодезических методов сбора информации. Вместе с развитием геодезии развивались и геодезические приборы от изобретения астролябии и угломера Герона и до новейших приборов, таких как GPS-приемники и лазерные сканеры. Но самой значимой и эффективной технологической новинкой стало внедрение в практику мониторинга устойчивости бортов карьеров радарных технологий.

Под кинематическими параметрами обрушения массивов горных пород понимают смещение, скорость смещения и ускорение скорости смещения характерных точек разрушающихся объектов.

Для анализа кинематических параметров были собраны и проанализированы данные о случаях обрушений в карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК» за период с 2014 по 2023 г.г.. Всего выбрано 22 случая потери устойчивости, которые являются задокументированными сотрудниками Геомеханической службы и по всем этим случаям есть данные радарного мониторинга о смещениях, скоростях и ускорениях. В таблице 2.1 приведены данные проанализированных обрушений. Целью такого анализа являлось установление параметра, по которому будет осуществляться дальнейший прогноз состояния массива.

Анализируя параметр «смещение» были определены предельные значения смещений. Под предельными значениями смещений понимается максимальное накопленное смещение участка борта, после которого произошел фактический отрыв породы от массива. Кроме того, для установления возможной зависимости между объемом обрушившейся горной массы и предельным значением смещения была построена диаграмма зависимости.

Из диаграммы следует, что для условий Ковдорского месторождения нет зависимости между объемами обрушающейся горной массы и предельными значениями смещений. Кроме того, анализируя графики смещений, невозможно

определить на каком этапе находится процесс разрушения, т.к. нет ярко выраженной точки максимума, следовательно, данный параметр не подходит для оценки состояния массива.

Анализируя параметр «скорость смещения» также были определены предельные значения скорости смещения горной породы непосредственно перед отрывом от массива и построена диаграмма зависимости скорости смещения массива от объема обрушившейся горной массы. Минимальное зафиксированное предельное значение скорости – 5 мм/ч, а максимальное 35 мм/ч. Из диаграммы следует, что для условий Ковдорского месторождения нет зависимости между объемами обрушающейся горной массы и предельными значениями скорости смещения. Однако **кинематический параметр «скорость смещения» является наиболее информативным для оценки состояния массива горных пород и прогноза вероятного обрушения, т.к. графики зависимости скорости смещения от времени склонны к достаточно плавному нарастанию и падению, а обрушения происходят при её ярко выраженном максимальном значении.**

Анализ ограниченной информации об ускорении скорости смещения массива показал, что основным недостатком данного параметра является слишком резкое возрастание и падение графиков в отличие от графиков скорости, где возрастание происходит плавно. Параметр «ускорение скорости смещения» резко реагирует на незначительные изменения скорости, кроме того, данный параметр может иметь и отрицательные значения в случаях уменьшения скорости смещения массива. Все вышеуказанное значительно затрудняет анализ данных и прогноз состояния массива. К тому же момент обрушения не характеризуется максимальным значением ускорения, как в случае с графиками скорости.

3 Анализ изменения скорости смещения массива при различных видах обрушений в условиях прочных скальных пород

Характерной особенностью условий разработки месторождений при открытых горных работах, является достаточно высокая доля приповерхностных, большей частью слабых слоёв пород, часто по своим свойствам приближающихся к грунтовым массивам.

Грунтовые массивы отличаются весьма малыми размерами слагающих их частиц (в пределах нескольких миллиметров), весьма малым между частицами, практически полным отсутствием систем структурных неоднородностей, за исключением слоистости, а также наличием естественного напряжённого состояния, обусловленного исключительно гравитационным полем.

По мере увеличения глубины карьеров доля грунтовых массивов уменьшается, а скальных, большей частью достаточно прочных пород, увеличивается.

Массивы скальных пород характеризуются ярко выраженной иерархично-блочной структурой, обусловленной широким развитием систем разномасштабных структурных неоднородностей. При этом размеры отдельных структурных блоков определяются расстояниями между соседними структурными неоднородностями одного ранга и могут варьировать в очень широких пределах от миллиметров до сотен метров и километров. Деформирование и разрушение иерархично-блочных сред может происходить как по законам сплошных, так и дискретных сред, в зависимости от соотношения размеров деформируемого объекта и параметров структурных неоднородностей [107]. Естественное напряжённое состояние скальных массивов, в общем случае, обусловлено гравитационно-тектоническими полями напряжений.

С точки зрения геомеханики борта карьеров следует рассматривать как специфические инженерные сооружения, в которых разные уступы имеют различный срок службы [108, 109].

При этом самые долгоживущие верхние уступы располагаются в наиболее ослабленных грунтовых массивах, где наиболее вероятными видами потери устойчивости являются оползневые явления.

Уступы, сложенные скальными породами, вследствие иерархично-блочной структуры с различной степенью интенсивности, ослабляются структурными неоднородностями, и здесь преобладающими проявлениями геомеханических процессов являются образования приконтурных зон нарушенных пород (зон неупругих деформаций и разрушений), в пределах которых возможно образование отдельных вывалов в масштабе одного или нескольких уступов.

3.1 Виды обрушений, зафиксированные в карьере «Железный»

Согласно источнику [110] в пределах карьера «Железный» наблюдаются следующие виды обрушений: вывалы и осыпи трещиноватых и дезинтегрированных пород, оползни-обрушения, клиновидные (призматические) обрушения, плоскостные обрушения, комбинированные.

Вывалы и осыпи трещиноватых и дезинтегрированных пород являются наиболее часто встречающимися и наименее опасными с точки зрения обеспечения устойчивости уступов и бортов карьера. Ее появление определяют наличие участков интенсивной трещиноватости и/или недостаточно качественная технология постановки уступов на конечный контур (Рисунок 3.1)



Рисунок 3.1– Пример осыпи трещиноватых и дезинтегрированных пород [110]

Оползневые явления развиваются преимущественно в зоне приповерхностной дезинтеграции скальных пород верхней части карьера (до 100 - 120 м от поверхности). В их формировании активное участие принимают поверхностные и подземные воды. Процесс разрушения массива развивается длительное время, иногда месяцами, и может захватывать огромные объемы массива. Перемещения, предшествующие обрушению, могут достигать десятков метров (Рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 - Пример образования оползня [110]

Клиновидный (призматический) тип обрушений образуется за счет взаимного подсечения двух и более поверхностей ослабления (трещины, разрывные нарушения, разломы) линия скрещения которых, наклонена в сторону карьерной выемки. Призма обрушения, ограниченная этими поверхностями и откосом уступа, имеет форму клина. Развитие масштабной деформации этого типа представляет реальную опасность для устойчивости уступа или группы (2 - 3) уступов (Рисунок 3.3) [110].



Рисунок 3.3 – Пример клиновидного (призматического) обрушения [110]

Плоскостное обрушение - это смещение пород по наклонной, в сторону карьерной выемки, поверхности, образованной трещиной, субпараллельной или близкой по простиранию откосу. Это наиболее опасный вид обрушения, так как может вызвать нарушение устойчивости не только уступа (группы уступов), но и всего борта [110] (Рисунок 3.4).



Рисунок 3.4– Пример плоскостного обрушения [110]

Стоит отметить, что в случае обрушения клинового или плоскостного типа предшествующий процесс деформирования массива, визуальное, мало заметен. Предшествующие перемещения массива достигают значений от десятой доли миллиметра до нескольких сантиметров. Время от начала деформирования массива и до обрушения может составлять 2-3 часа.

Кроме вышеперечисленных обрушений встречаются различного рода комбинированные обрушения, а также деформация типа «Консоль». На рисунке 3.5 представлен вариант комбинированного обрушения, которое образовано двумя диагональными и продольной трещиной.

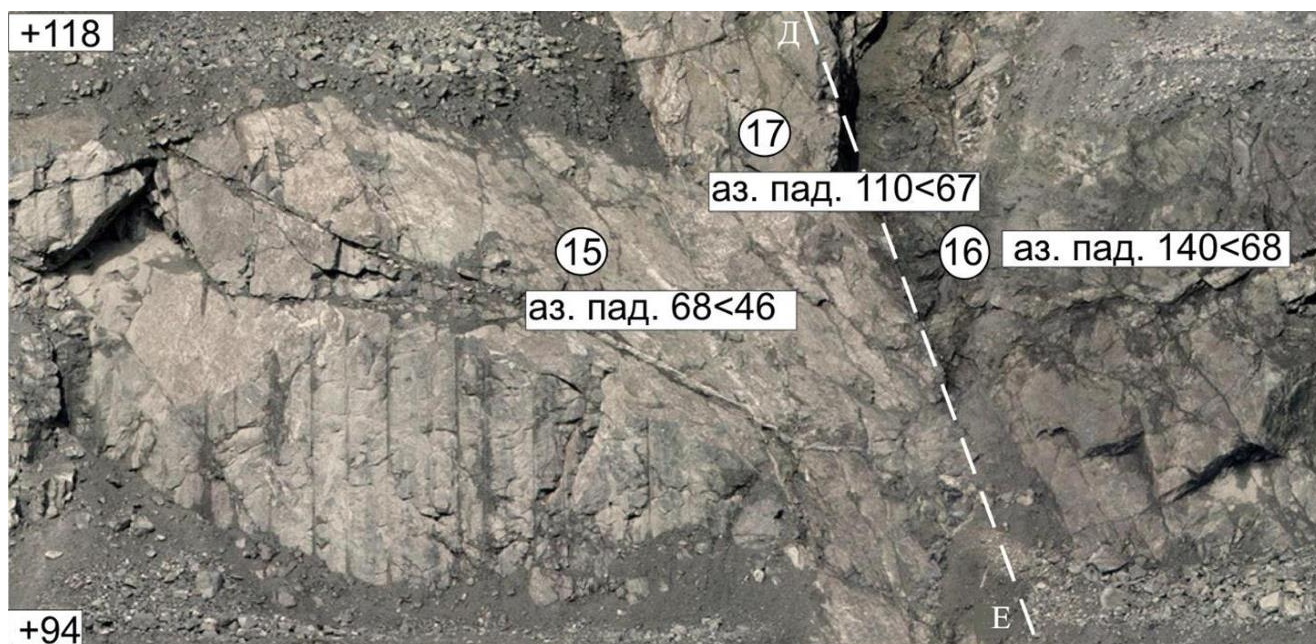


Рисунок 3.5 - Вариант комбинированного обрушения
(две диагональные и одна продольная трещины) [110]

Учитывая наличие в породном массиве Ковдорского месторождения систем трещин с относительно пологим ($25-40^\circ$) падением, возможны обрушения, призма которых ограничена двумя крутопадающими диагональными трещинами, и подрезающей их снизу полой продольной трещиной, падающей в отработанное пространство карьера (Рисунок 3.6).

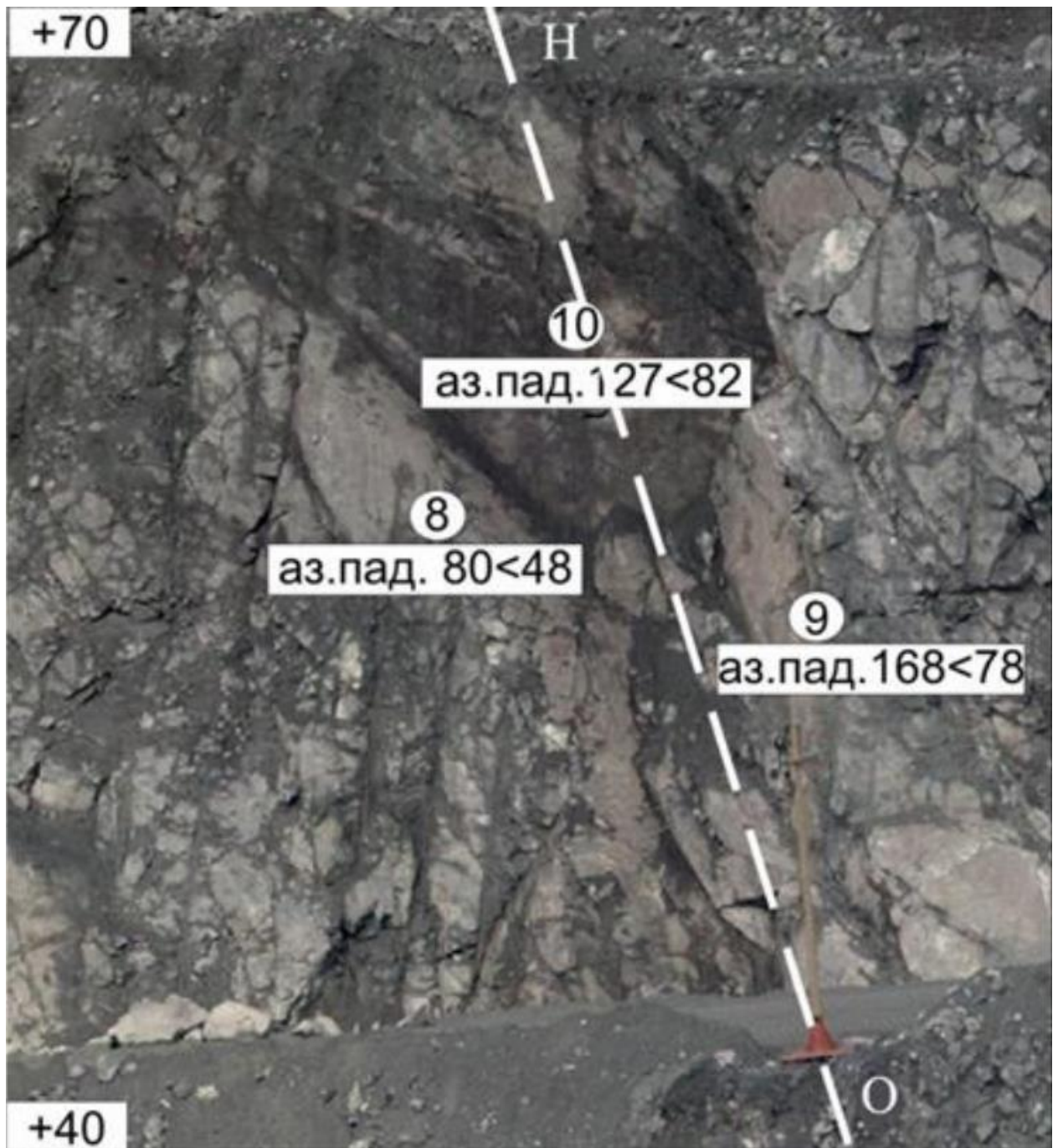


Рисунок 3.6 - Вариант комбинированного обрушения
(две крутопадающие диагональные и пологая продольная трещины) [110]

Деформация типа «Консоль» образуется трещиной, ориентированной под острым углом к простиранию уступа (Рисунок 3.7).

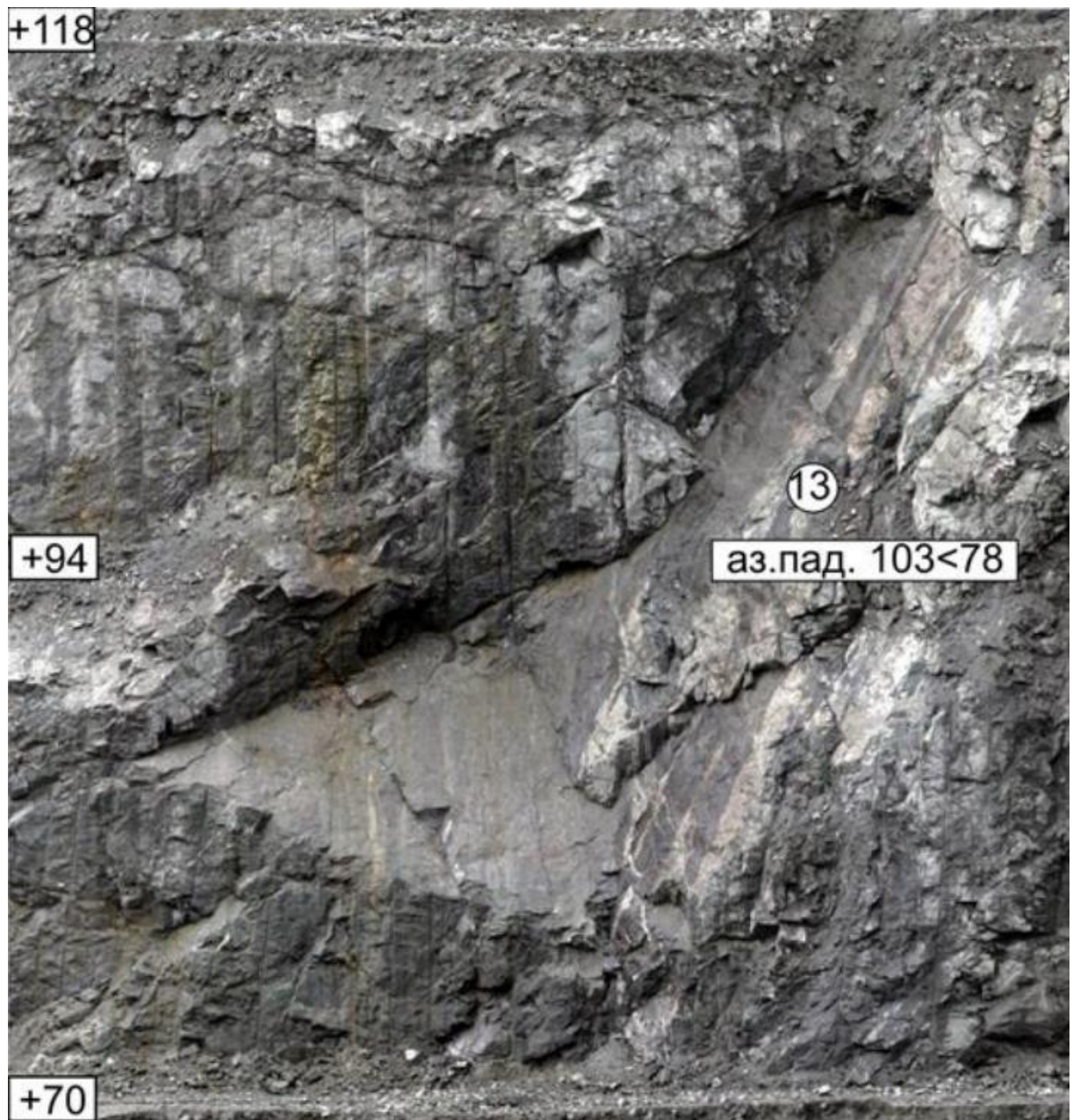


Рисунок 3.7 - Деформация типа «Консоль» [110]

Указанные типы говорят о большом разнообразии механизмов, по которым могут происходить обрушения. Рассмотрим изменение графиков скорости смещения массива при различных видах обрушений.

3.2 Классификация обрушений в карьере «Железный» по кинематическому параметру скорость смещения

Указанные ранее обрушения можно разделить на 3 группы по характеру развития процесса разрушения. Под характером развития процесса разрушения понимается изменение графиков скорости смещения разрушающегося участка борта во времени.

Оползни-обрушения, по характеру развития процесса разрушения, которые зафиксированы в карьере «Железный», можно выделить в отдельную (первую) группу обрушений. Всего выделено 6 обрушений из 22 графики скорости смещения которых, типичны для данного типа обрушения рисунок 3.8 (обрушение №3), 3.9 (обрушение №4), 3.10 (обрушение №10). Кроме того, график скорости, приведенный в предыдущей главе на рисунке 2.15, также является типичным.

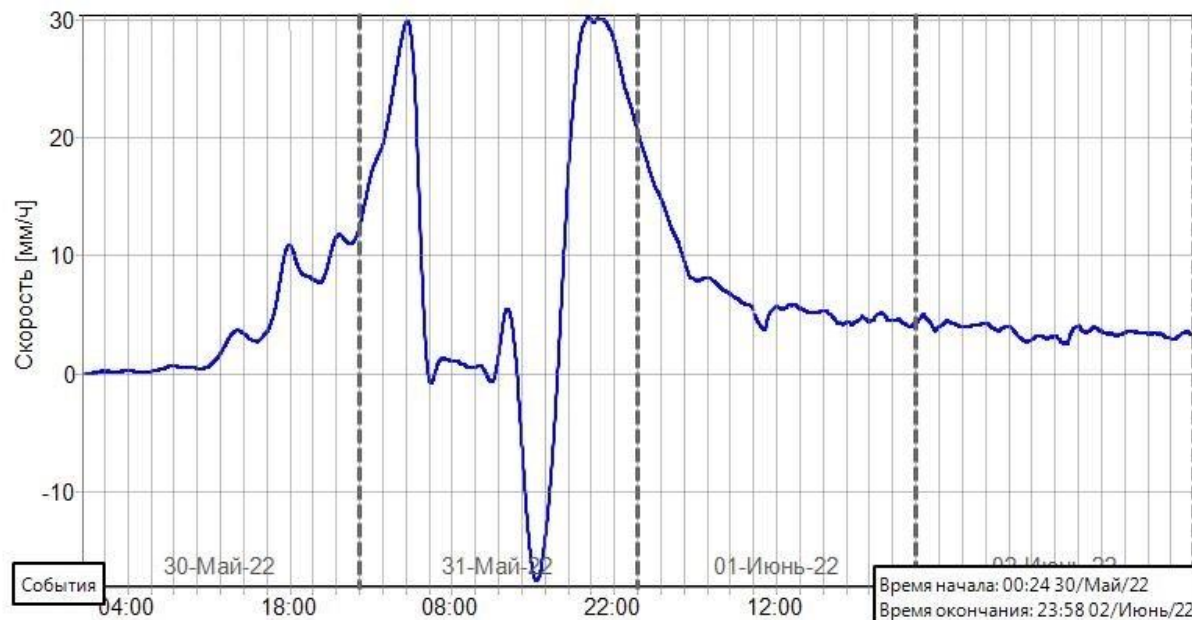


Рисунок 3.8 – Типичный график скорости смещения массива горных пород при оползневом обрушении (обрушение №3).

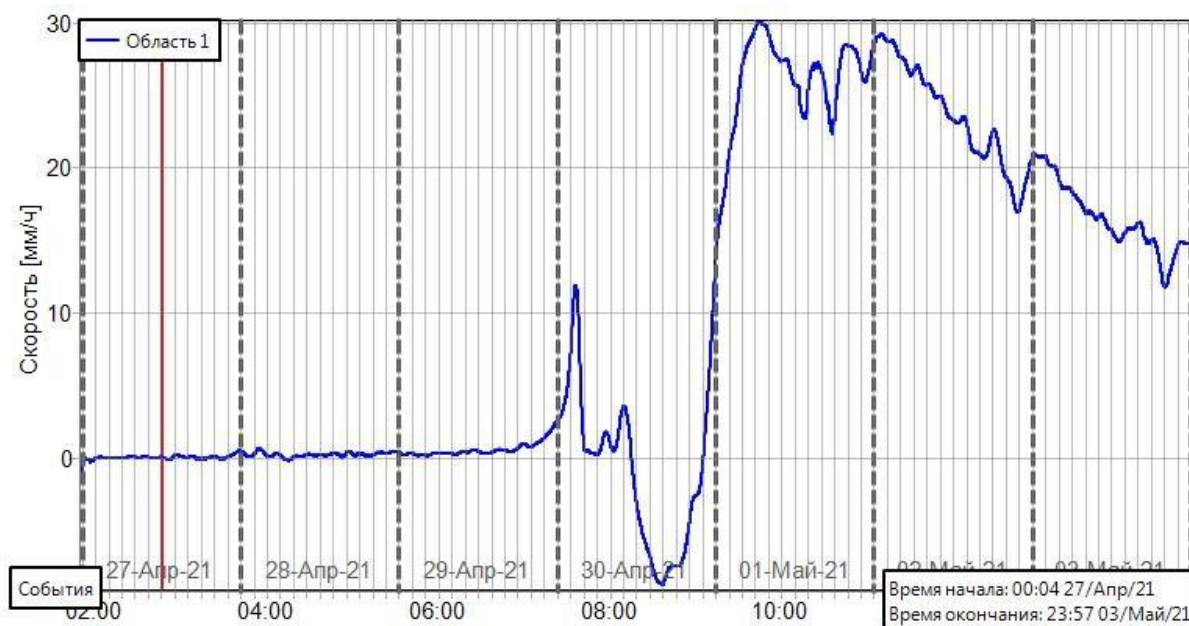


Рисунок 3.9 – Типичный график скорости смещения массива горных пород при оползневом обрушении (обрушение №4)

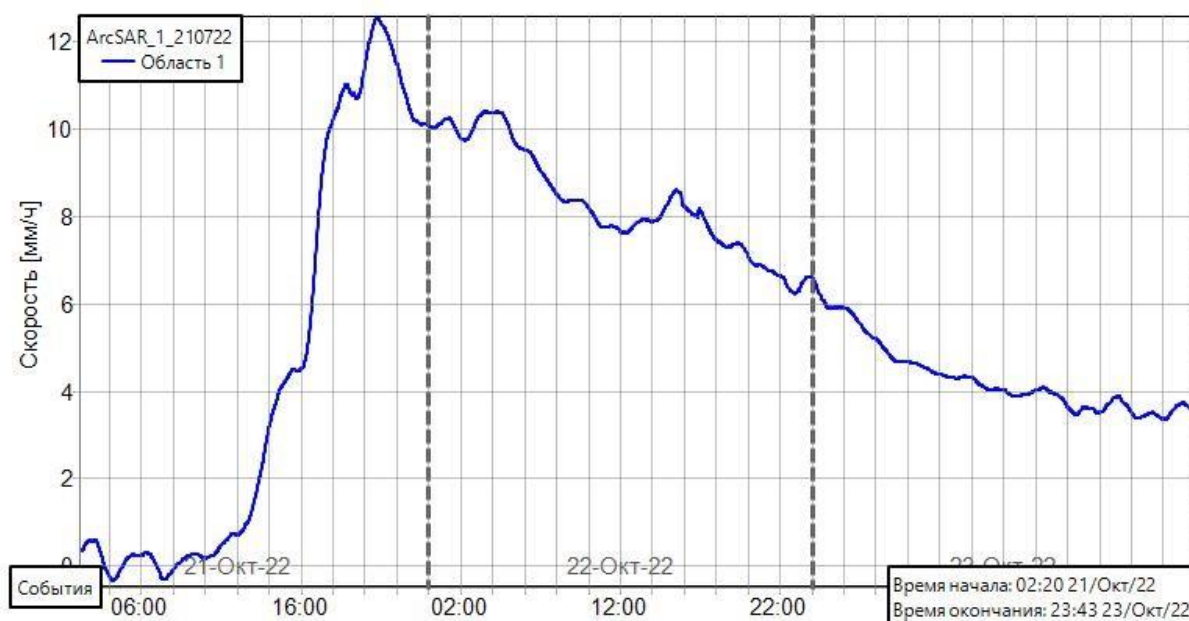


Рисунок 3.10 – Типичный график скорости смещения массива горных пород при оползневом обрушении (обрушение №10).

Обрушения произошли на верхних горизонтах карьера в массивах слабых и дезинтегрированных пород. Характерными особенностями данной группы обрушений является довольно резкое нарастание скорости, которое сопровождается осыпанием горной массы средней и высокой интенсивности. Кроме того, после основного обрушения наступает второй период, когда скорости

смещения либо вновь возрастают, либо остаются высокими после основного обрушения и могут быть такими на протяжении нескольких дней. За этот период также фиксируется осыпание горной массы средней и высокой интенсивности, однако крупных по объему и размеру кусков породы обрушений уже не происходит. После этого наступает плавное затухание.

Одной из характерных особенностей для каждой из групп обрушений, показанных в этой главе, будет являться время реализации обрушения. Время реализации обрушения – это период времени от фиксации обрушения до момента схода основного объема горной массы. Для оползней, зафиксированное время реализации от 7 часов до 59 часов (в среднем 25 часов), однако после основного обрушения еще наблюдаются незначительные вывалы в течение 2-5 дней.

Остальные типы обрушений, зафиксированные в карьере «Железный», которые представлены в главе 3.1, по кинематике протекания процесса разрушения можно разделить на две группы. Все эти обрушения так или иначе происходили в массиве скальных пород, однако существенным показателем их различия является наличие или отсутствие в массиве разрывных нарушений, которые делят массив на мелкие структурные блоки, размерами 0,5-3 м³. Типичные графики скорости смещения массива при обрушениях в сильнотрещиноватом (дезинтегрированном) массиве представлены на рисунках 3.11 (обрушение №2), 3.12 (обрушение №5), 3.13 (обрушение №13) и 3.14 (обрушение №22)

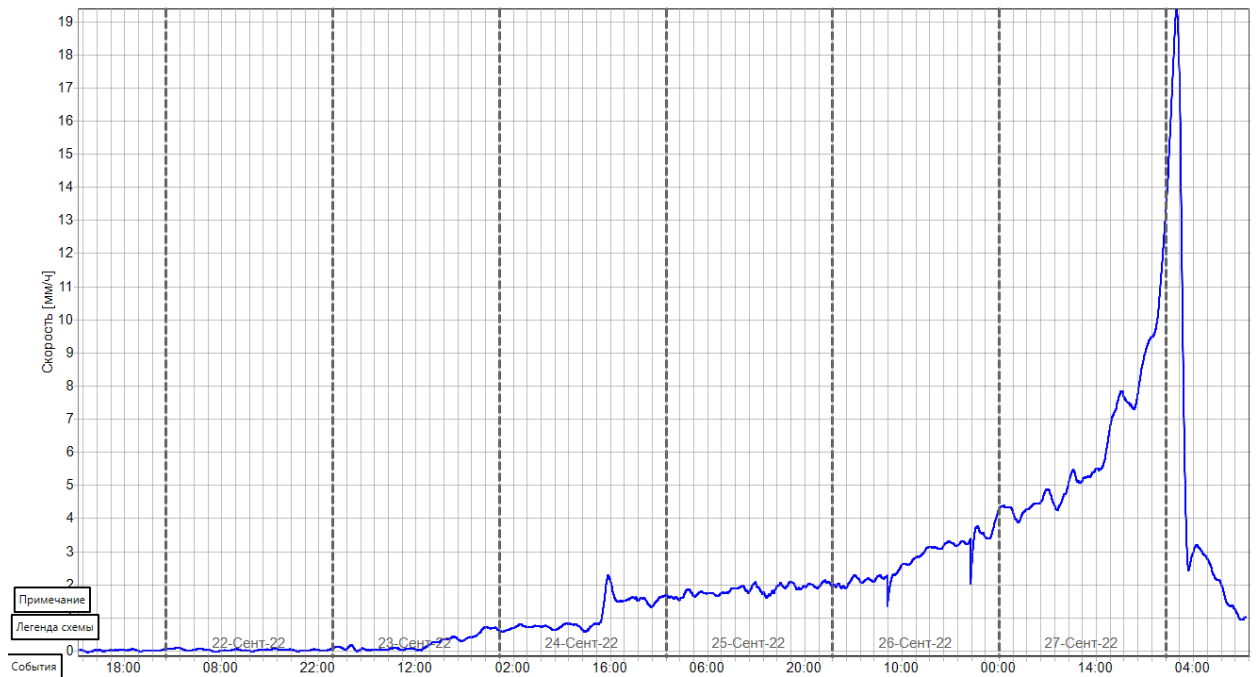


Рисунок 3.11 - Графики скорости смещения массива при обрушениях в сильнотрещиноватом (дезинтегрированном) скальном массиве (обрушение №2)

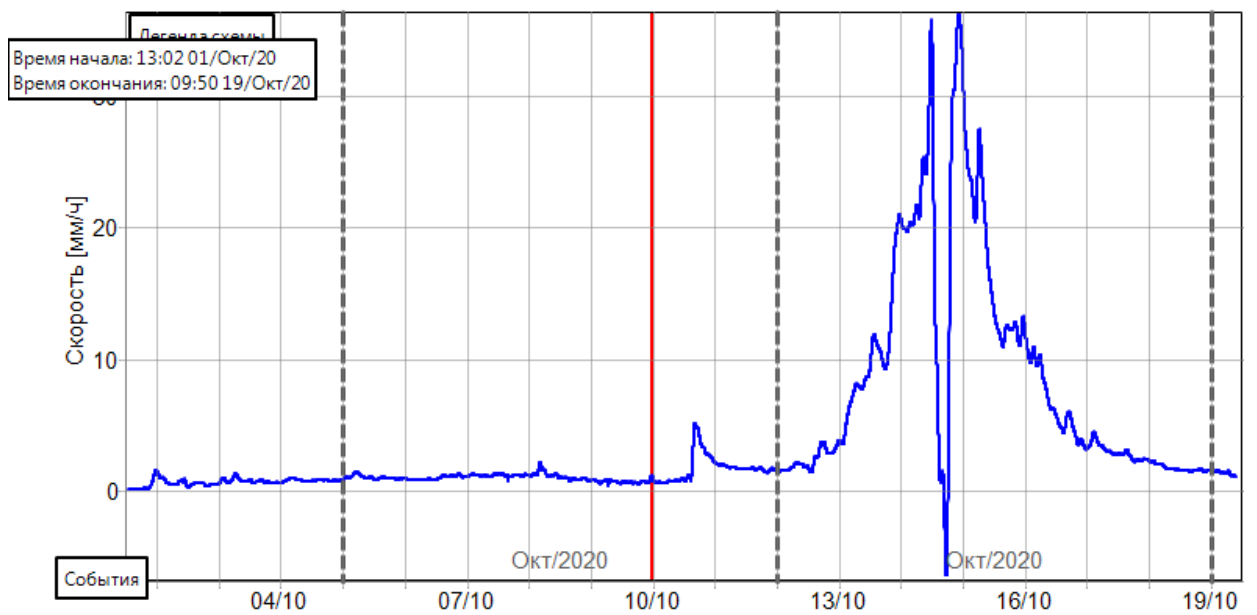


Рисунок 3.12 - Графики скорости смещения массива при обрушениях в сильнотрещиноватом (дезинтегрированном) скальном массиве (обрушение №5)

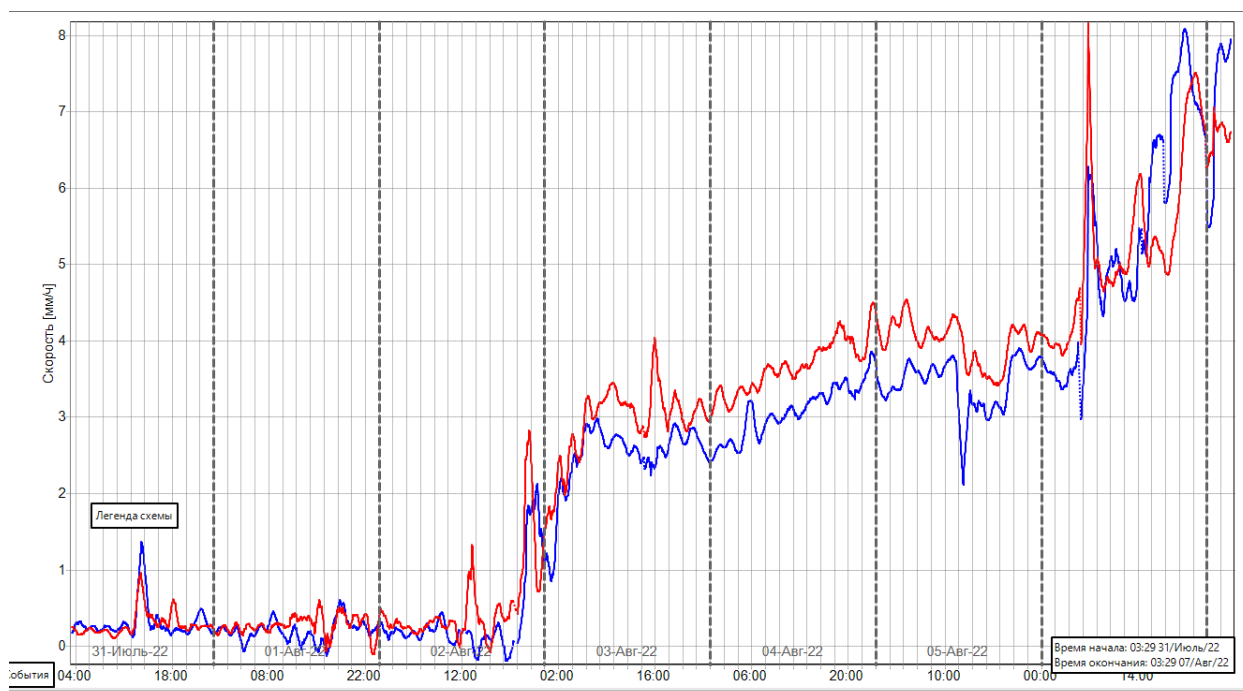


Рисунок 3.13 - Графики скорости смещения массива при обрушениях в сильнотрещиноватом (дезинтегрированном) скальном массиве (обрушение №13)

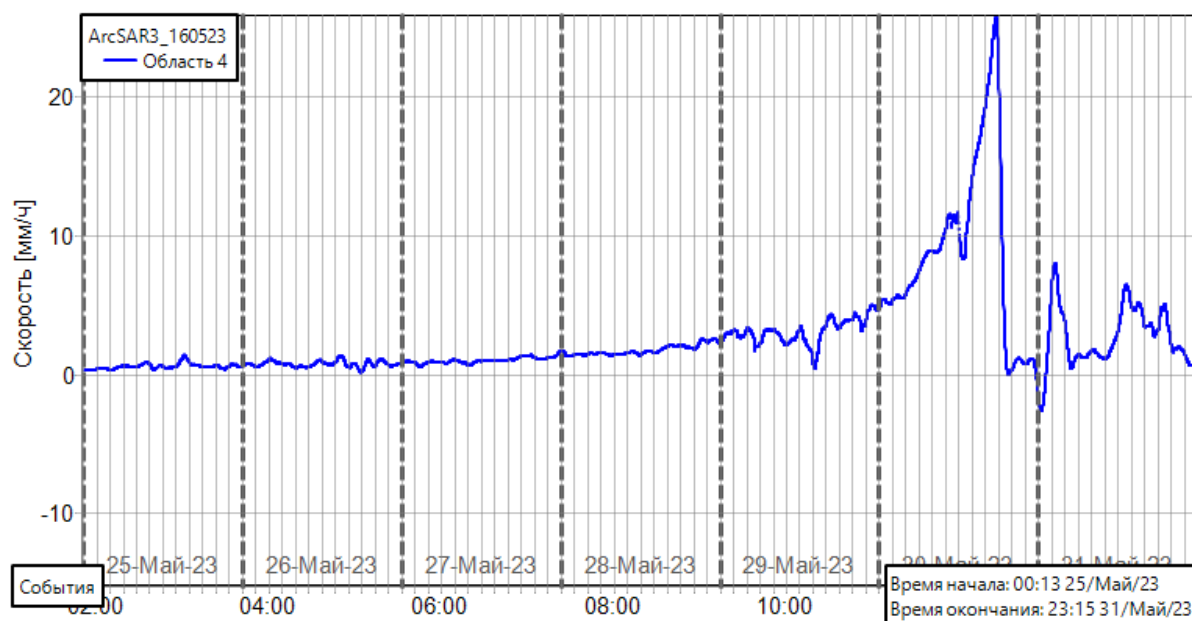


Рисунок 3.14 - Графики скорости смещения массива при обрушениях в сильнотрещиноватом (дезинтегрированном) скальном массиве (обрушение №22)

Выделено 10 обрушений данного вида из 22. Характерными особенностями является плавное нарастание скорости, которое может продолжаться от нескольких часов до нескольких дней. Процесс увеличения скорости смещения массива также сопровождается осыпанием горной массы средней и высокой

интенсивности. После обрушения скорость, как правило, снижается, однако могут появляться небольшие, относительно основного участка, области с повышенными значениями скоростей. Как правило, это зависшие куски горной массы, которые впоследствии обрушаются.

Что касается времени реализации данного вида обрушения, то в отличие от оползневых явлений довольно часто данный период времени может исчисляться днями, а не часами. Минимальное значение составляет 13 часов, а максимальное 303 часа (больше 12 суток). В среднем, значение периода времени для реализации данного обрушения составляет 103 часа (больше 4 суток).

Третья группа обрушений, также как вторая, фиксируется в массивах скальных горных пород. В отличие от второй группы данные обрушения происходят в мало трещиноватом массиве. Этот факт делает такого рода обрушения наиболее опасными, т.к. они трудно прогнозируемы и визуально достаточно тяжело установить участки, на которых они могут произойти. Причина подобных проблем кроется как раз в свойствах самого массива. Как правило, высокопрочные массивы также являются и достаточно хрупкими, вследствие чего, при формировании подобного обрушения, процесс отрыва породы от массива наступает достаточно быстро. На рисунках 3.16 (обрушение №9), 3.17 (обрушение №14) и 3.18 (обрушение №19) представлены типичные графики скорости смещения массива горных пород при данном виде обрушений.

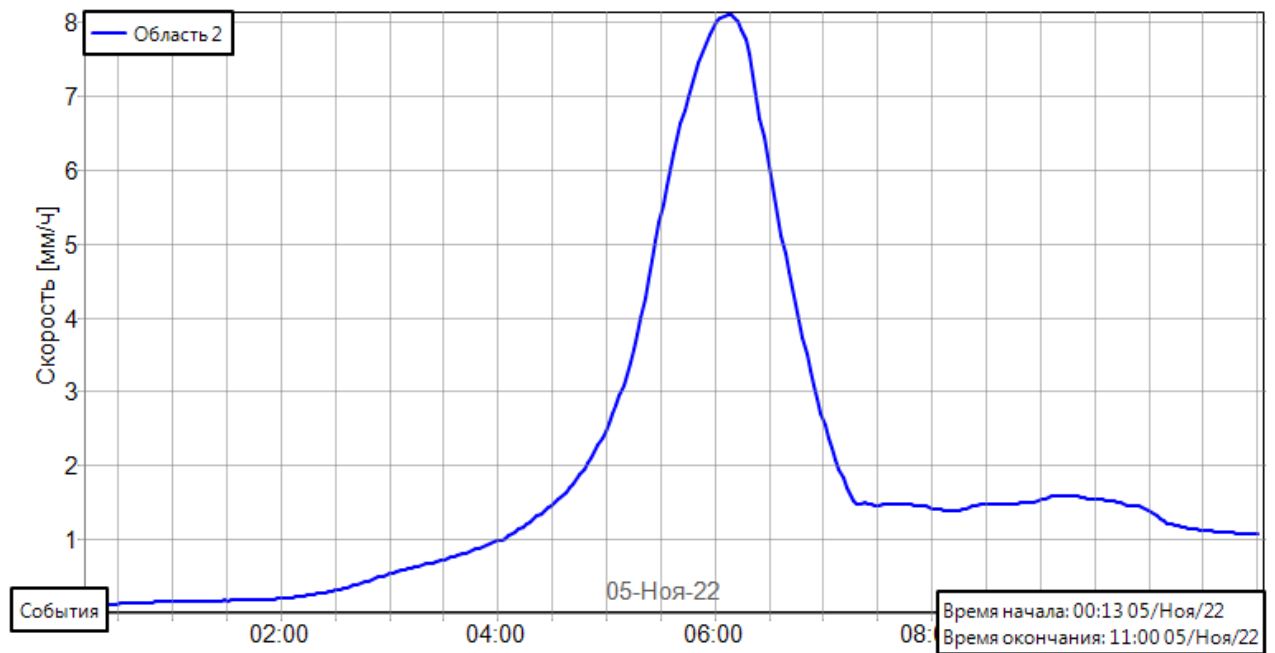


Рисунок 3.16 - Графики скорости смещения горных пород при обрушении скального массива (обрушение №9)

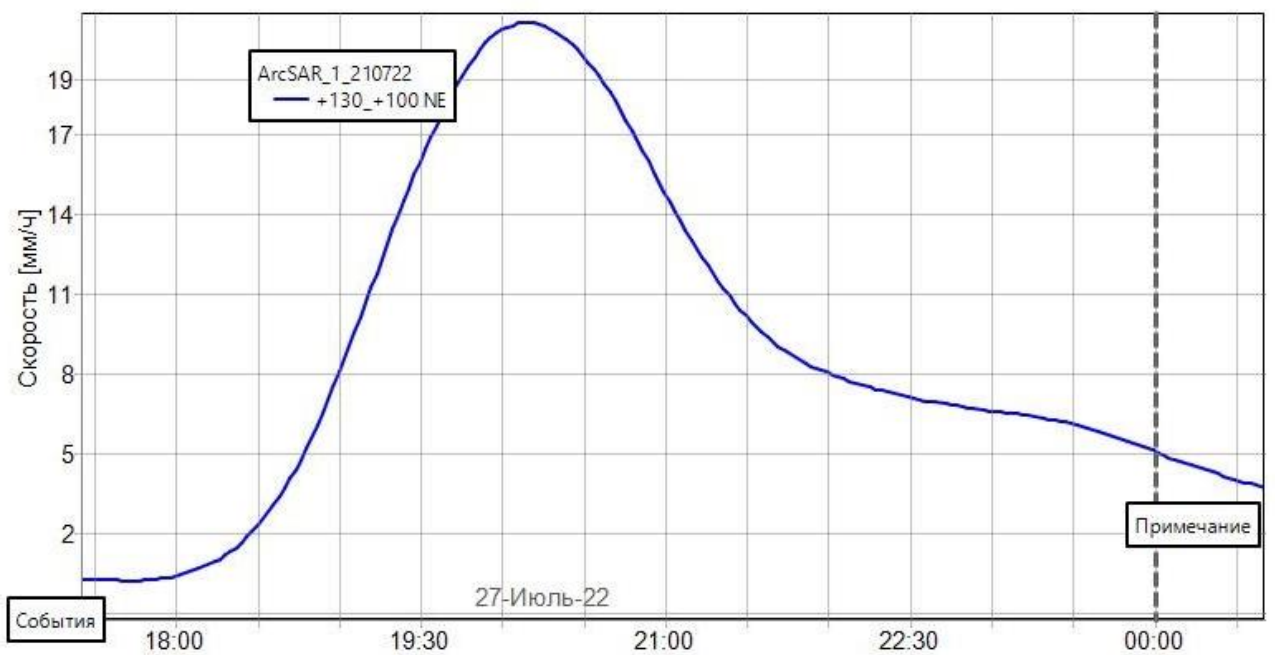


Рисунок 3.17 - Графики скорости смещения горных пород при обрушении скального массива (обрушение №14)

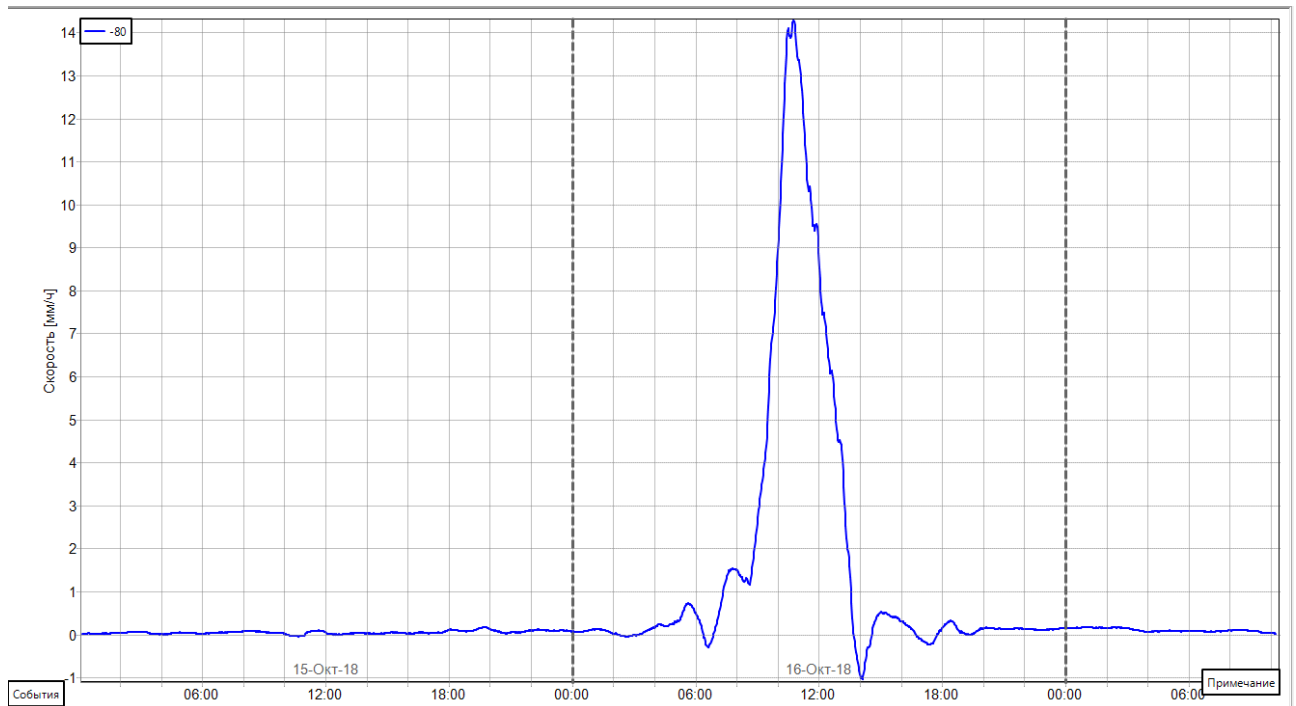


Рисунок 3.18 - Графики скорости смещения горных пород при обрушении скального массива (обрушение №19)

Выделено 6 обрушений данного вида из 22 проанализированных. В отличие от дезинтегрированных скальных массивов скорость смещения, в данном случае, увеличивается достаточно быстро, а в некоторых случаях - мгновенно, при этом перед обрушением либо не наблюдается осыпание горной массы, либо фиксируется осыпание кусков породы малых размеров с низкой интенсивностью. Минимальное время реализации подобных обрушений 2 часа, максимальное зафиксированное время 18 (в среднем 8 часов).

Выводы к главе 3

С точки зрения геомеханики борта карьеров следует рассматривать как специфические инженерные сооружения, в которых разные уступы имеют различный срок службы. При этом самые долгоживущие верхние уступы располагаются в наиболее ослабленных грунтовых массивах, где наиболее вероятными видами потери устойчивости являются оползневые явления. Уступы, сложенные скальными породами, вследствие иерархично-блочной структуры, с различной степенью интенсивности ослабляются структурными неоднородностями, и здесь преобладающими проявлениями геомеханических процессов являются образования отдельных вывалов в масштабе одного или нескольких уступов.

Согласно собранным данным в пределах карьера «Железный», наблюдаются следующие виды обрушений: вывалы и осыпи трещиноватых и дезинтегрированных пород, оползни-обрушения, клиновидные (призматические) обрушения, плоскостные обрушения. Кроме того, выделяются также различного рода комбинированные обрушения, такие как: комбинированные обрушения (две диагональные и продольная трещины), комбинированные обрушения (две крутопадающие диагональные и пологая продольная трещины), а также обрушение типа «Консоль».

Анализ данных о кинематических параметрах обрушений позволил установить, что **зафиксированные обрушения в карьере «Железный» можно разделить на 3 группы по характеру развития процесса разрушения: оползни-обрушения, обрушения в скальных сильно трещиноватых массивах и обрушения в скальных мало трещиноватых массивах. Каждая выделенная группа характеризуется типичными графиками нарастания скорости смещения массива, а также временем реализации обрушения.** В первую группу обрушений по характеру развития процесса разрушения выделены оползни-обрушения. Особенности данной группы является довольно резкое нарастание скорости, которое сопровождается осыпанием горной массы средней и

высокой интенсивности. После основного обрушения наступает второй период, когда скорости смещения либо вновь возрастают, либо остаются высокими после основного обрушения и могут быть такими на протяжении нескольких дней. Зафиксированное время реализации составляет от 7 часов до 59 часов (в среднем 25 часов), однако после основного обрушения еще наблюдаются незначительные вывалы в течение 2-5 дней.

Во вторую группу выделены обрушения, которые происходили в сильнотрещиноватом (дезинтегрированном) массиве скальных пород. Они характеризуются плавным нарастанием скорости, которое может продолжаться от нескольких часов до нескольких дней. Процесс увеличения скорости смещения массива также сопровождается осыпанием горной массы средней и высокой интенсивности. Минимальное значение времени реализации подобных обрушений составляет 13 часов, а максимальное 303 часа (больше 12 суток). В среднем, значение периода времени для реализации данного обрушения составляет 103 часа (больше 4 суток).

Третья группа обрушений также как вторая фиксируется в массивах скальных горных пород. В отличие от второй группы данные обрушения происходят в мало трещиноватом массиве. Скорость смещения, в данном случае, увеличивается достаточно быстро, а в некоторых случаях - мгновенно, при этом перед обрушением либо не наблюдается осыпание горной массы, либо фиксируется осыпание кусков породы малых размеров с низкой интенсивностью. Минимальное время реализации подобных обрушений 2 часа, максимальное зафиксированное время 18 (в среднем 8 часов).

4 Определение критического значения кинематического параметра скорость смещения

Для безопасного ведения открытых горных работ в карьере «Железный» необходимо установить критическое значение скорости смещения массива. Под критическим значением скорости смещение подразумевается скорость смещения, при превышении которой обрушение неизбежно произойдет.

В 2019 году были разработаны Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности (ФНП) «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов» и к ним было разработано «Руководство по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов». В данном руководстве в пункте 3.10.4 приведена таблица с критическими скоростями при проведении оперативного мониторинга (таблица 4.1).

Таблица 4.1 - Ориентировочные уровни сигналов оповещения для оперативного мониторинга

Сигнал тревоги	Характеристика смещений	Смещения (автоматизированный мониторинг), мм/час	Смещения (дискретный мониторинг), мм/сут	
			Слабые, пластичные породы	Прочные, хрупкие породы
Нормальный режим	Неактивные, регрессивные	<2	<5	<3
Уровень 1- ВНИМАНИЕ	Постоянные	2÷5	5÷10	3÷8
Уровень 2- ОПАСНО	Прогрессирующие	5÷10	10÷50	8÷20
Уровень 3- Стоп	Критические	>10	>50	>20

Из данных таблиц 4.1 следует, что критическое значение составляет более 10 мм/ч. Сопоставляя это значение с данными о предельных скоростях смещения массива рассмотренных обрушений, приведенными в таблице 2.3 можно сделать вывод, что 9 из 22 обрушений (41 %) даже не достигли подобных значений и обрушились при меньших значениях. Кроме того, для того что бы оперативно

оповестить персонал и вывести рабочих и технику из опасной зоны необходимо минимум 1-2 часа с момента объявления тревоги. В дополнение ко всему, для того, чтобы сигнал тревоги не стал неожиданным для оператора и руководства рудника необходимы промежуточные сигналы, как показано в таблице 4.1.

Необходимо отметить, что задача определения критических значений скорости смещения массива горных пород обозначилась одной из первых, как только стационарный радар IBIS FM был установлен в карьере «Железный» в 2014 году.

4.1 Определение критической скорости смещения массивов прочных скальных пород

Изначально были проанализированы данные о двух имеющихся на тот момент обрушениях, это обрушения под номерами 21 (от 01.10.2014 г.) и 7 (от 24.08.2015 г.). В то время все первичные данные мониторинга отправлялись в Италию для анализа и возвращались на бумажных носителях в виде отчетов, причем в отчетах указаны были только графики смещений, следовательно, значение скорости смещения приходилось высчитывать вручную, что очевидно давало некую погрешность.

Первое зафиксированное обрушение, которое произошло 01.10.2014 г. (№21) имело объем не более 500 м³ и особой информативностью не обладало, поскольку значения скорости смещения массива были достаточно минимальны, а предельная скорость смещения была 1,6 мм/ч. На рисунке 4.1 представлен график рассчитанной скорости смещения массива при обрушении №21.



Рисунок 4.1 - График рассчитанной скорости смещения массива при обрушении №21

24 августа 2015 г. на восточном участке борта (гор. +70 м; -35 м) произошло крупное обрушение размером 180 000 м³, которое также было зафиксировано радаром [8, 9].

По величинам перемещений, предшествующим обрушениям, рассчитывались значения скоростей, и был построен соответствующий график, который показан на рисунке 4.2.

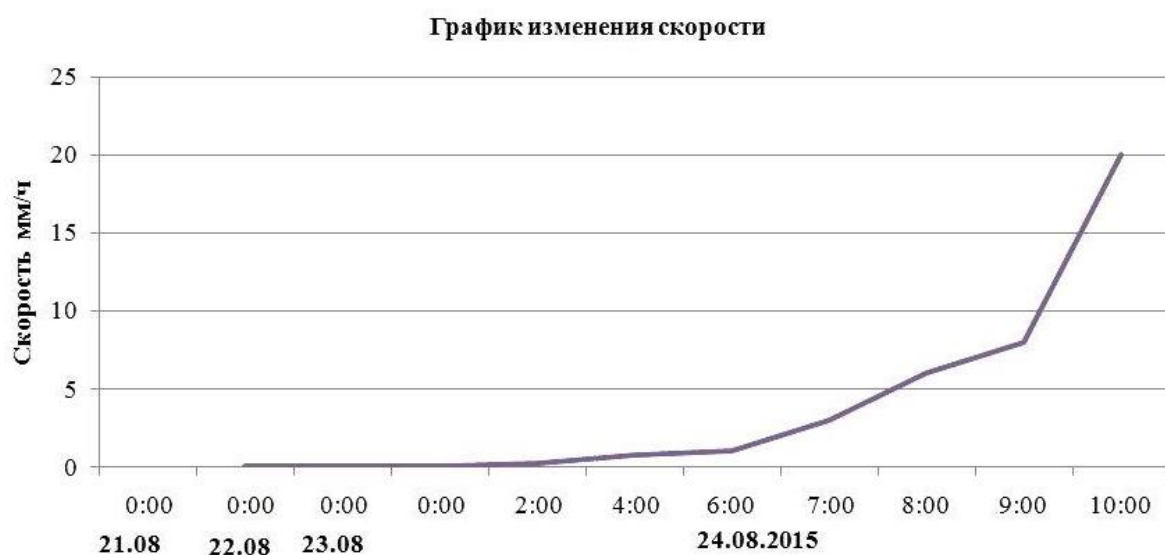


Рисунок 4.2 - График изменений скорости смещений во времени (обрушение № 7 от 24 августа 2015)

Из данных, приведенных на рисунке 4.2 следует, что резкое увеличение значений скорости произошло около 7 часов 24 августа (скорость от 1 мм/ч до 3 мм/ч). После этого скорость развития процесса продолжала возрастать до момента обрушения, которое наступило через 4 часа. Опираясь на эти данные, было сделано предположение о том, что ключевым индикатором скорого обрушения можно считать резкое увеличение скорости от 1 до 3 мм/ч, а скорость 3 мм/ч может являться критической для реализации обрушения.

После приведенного выше обрушения довольно долгое время отсутствовали данные об обрушениях. Это было вызвано различного рода организационными, бюрократическими и техническими причинами. В начале 2018 г. радарная система была запущена вновь. И для проверки достоверности предположений о значении критической скорости исследования продолжились.

08 октября 2018 г. произошло обрушение в массиве скальных пород (обрушение №20). Процесс разрушения от начала и до момента обрушения составил приблизительно 18 часов. На рисунке 4.3 приведен график скорости развития процесса деформирования во времени с отмеченным красным цветом критическим значением скорости.

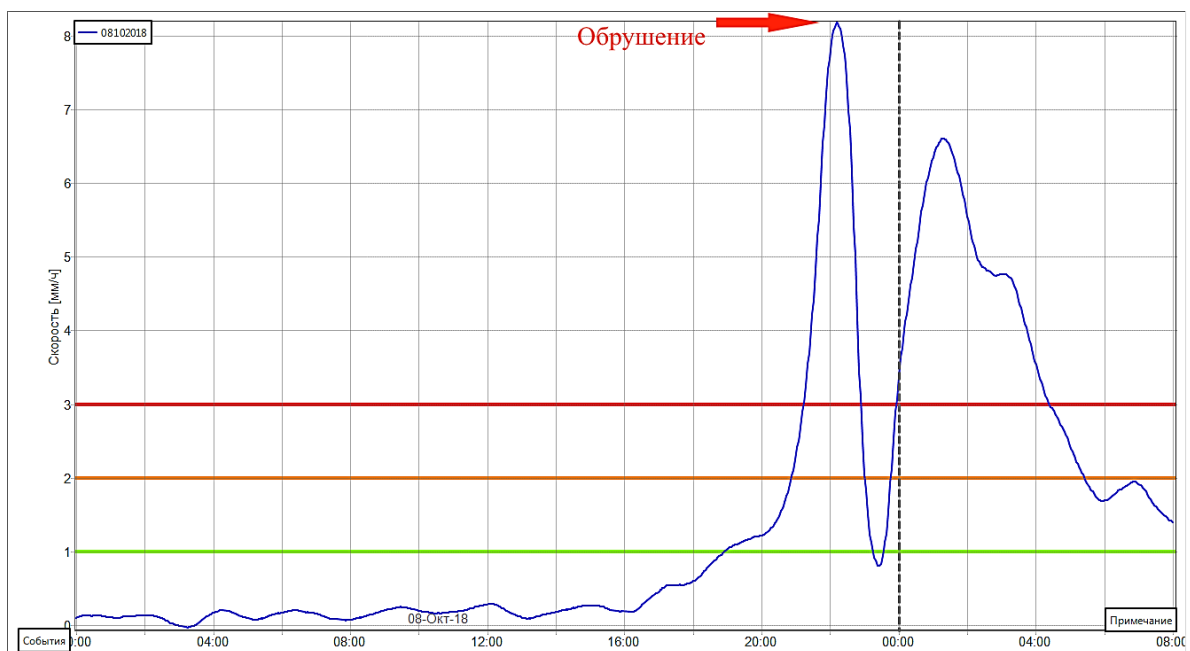


Рисунок 4.3 - График скорости смещения массива обрушения №20 (от 08.10.2018) с выставленным критическим значением

Обрушение произошло приблизительно через 1 час после превышения установленной критической скорости 3 мм/ч.

16 октября 2018 г. произошло еще одно обрушение в массиве скальных пород (обрушение №19). Период времени реализации обрушения составил приблизительно 7 часов. На рисунке 4.4 приведен график скорости развития процесса разрушения во времени с выставленным критическим значением скорости. Предупреждение сработало около 9 часов утра, то есть за 3 часа до обрушения, произошедшего в 12 часов.

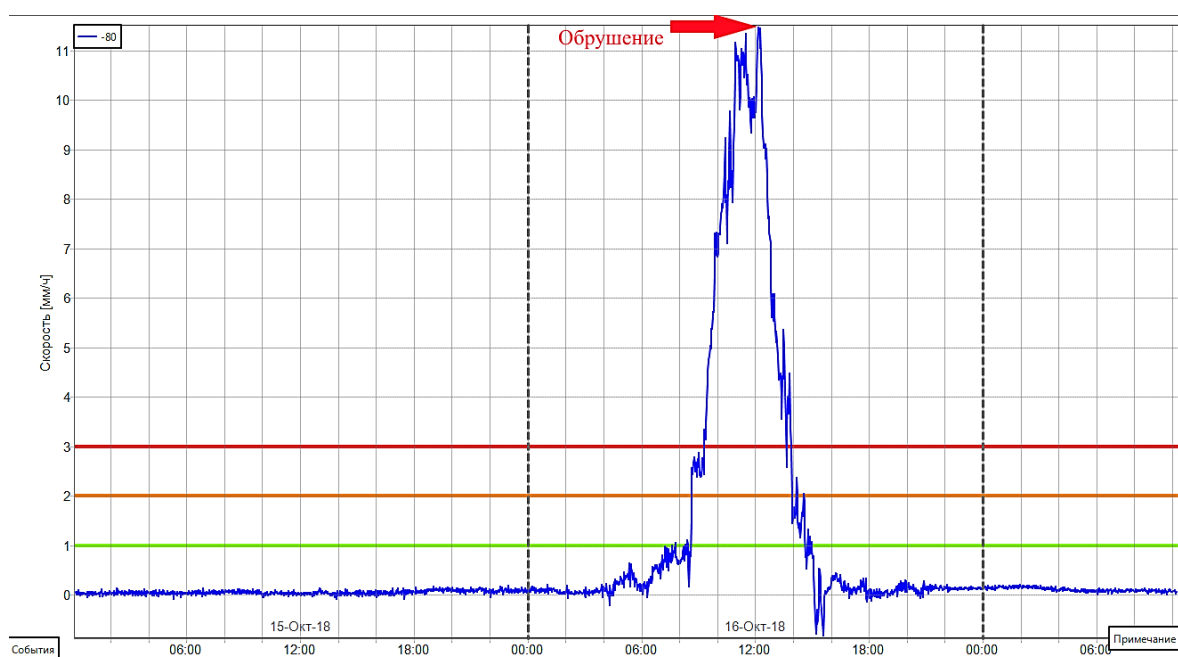


Рисунок 4.4 - График скорости смещения массива обрушения №19 (от 16.10.2018) с выставленным критическим значением

17 октября 2018 г. произошло обрушение в массиве дезинтегрированных скальных пород (обрушение №18). График скорости развития процесса разрушения во времени с выставленным критическим значением скорости приведен на рисунке 4.5.

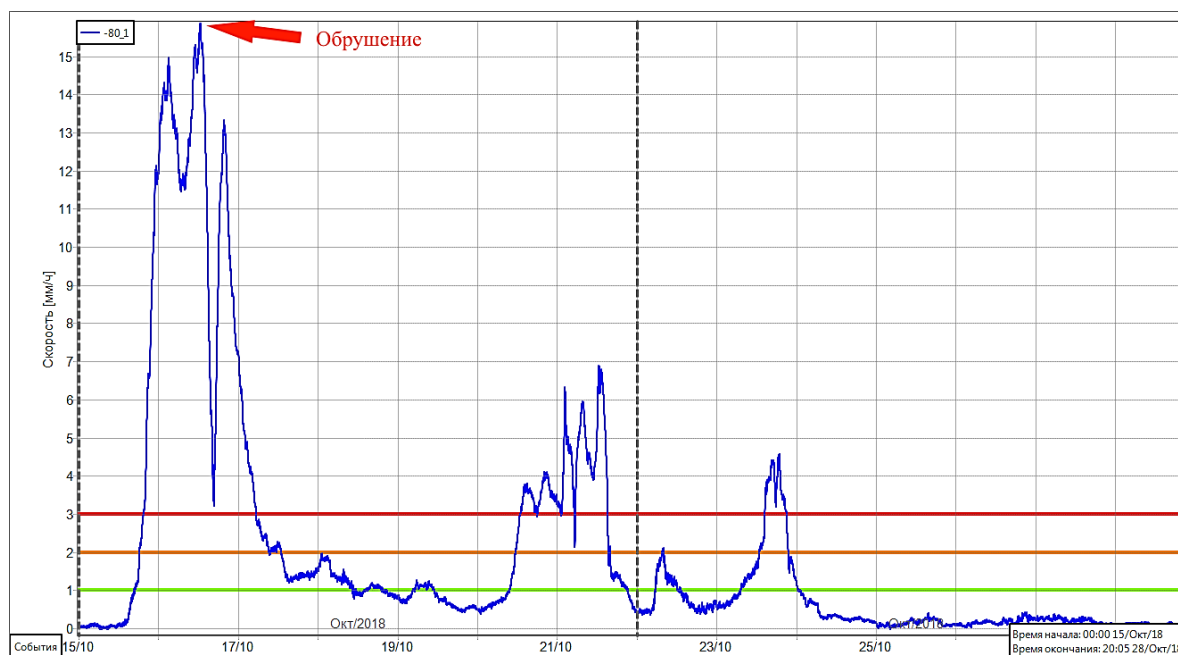


Рисунок 4.5 - График скорости смещения массива обрушения №18 (от 17.10.2018) с выставленным критическим значением

Процесс разрушения до момента основного обрушения составил приблизительно 24 часа. Время от превышения предельной скорости и до момента основного обрушения составило приблизительно 20 часов. На графике также видно, что процесс разрушения продолжался еще 10 дней после обрушения и на этом участке наблюдались осыпи средней интенсивности.

Следующие два обрушения произошли на одном и том же участке борта карьера.

В сентябре 2020 г. сотрудниками Геологического института КНЦ РАН было проведено обследование данного участка и составлена информационно-аналитическая записка от 14.09.2020 г. в которой указано:

«- на рассматриваемом участке массив пород характеризуется контрастным строением: участки дезинтегрированных и сильнотрещиноватых пород чередуются с относительно монолитными крупными блоками;

- приповерхностная зона массива пород нарушена и дезинтегрирована в ходе проведения горных (буровзрывных) работ;

- после проведения буровзрывных работ по ликвидации потенциальной призмы обрушения и схода осыпи – деформации №24 от декабря 2019 г. откос

уступов +10/-20 м. стал представлять собой преимущественно дезинтегрированную массу с углом, близким к углу естественного откоса...»

Подобного рода строение массива существенно затрудняет анализ и интерпретацию данных радарной системы мониторинга, поскольку велика вероятность обрушений, как второй, так и третьей группы, выделенных в предыдущей главе по кинематическому параметру скорость смещения.

27 августа 2020 г. на данном участке произошло крупное обрушение плоскостного типа объемом около 6000 м³ (обрушение №6).

На рисунке 4.6 приведен график скорости смещений участка массива.

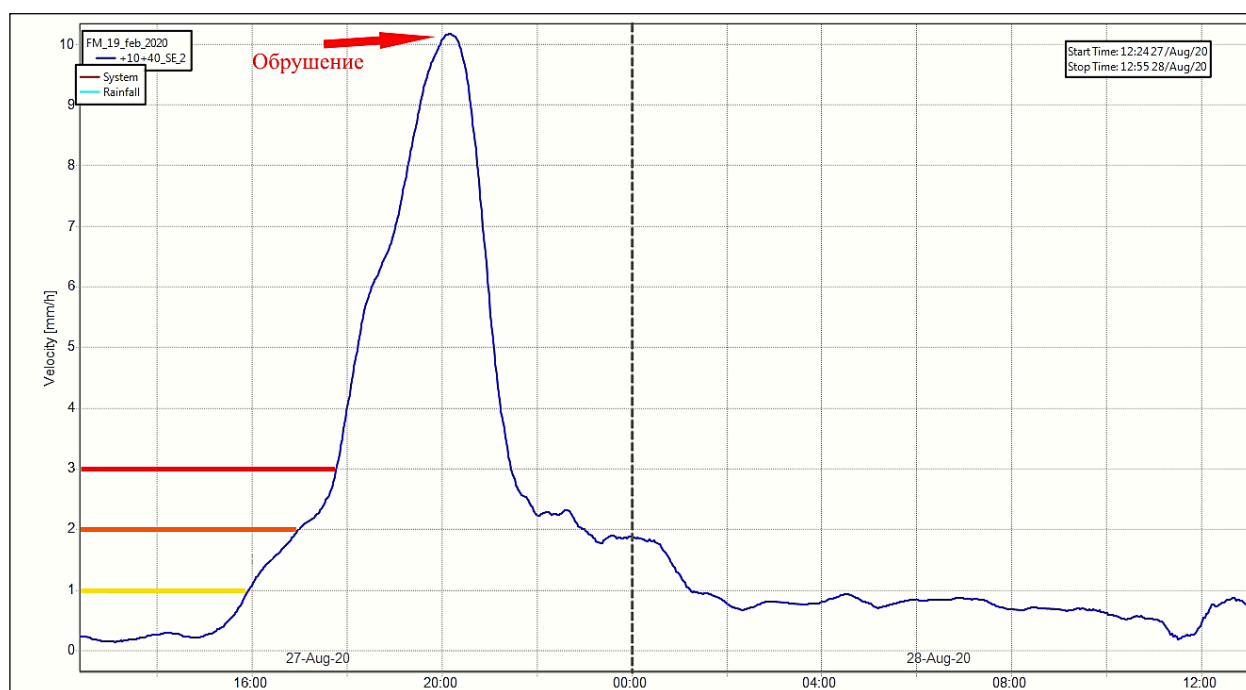


Рисунок 4.6 – График скорости смещения массива горных пород №6 (от 27.08.2020) с выставленным критическим значением

Приблизительно в 15:10 скорость начала увеличиваться и к 15:55 превысила первый порог в 1 мм/ч. Второй порог в 2 мм/ч был превышен в 17:00. В 18:50 скорость смещения массива превысила критическое значение 3 мм/ч и сработал сигнал тревоги 4 уровня. После этого скорость продолжила возрастать, приблизительно в 20:00 произошло обрушение, то есть спустя 1 час 10 минут после подачи сигнала 4 уровня.

14 октября 2020 г. на данном участке произошло еще одно обрушение (№5) объемом около 5000 м³.

На рисунке 4.7 приведен график скорости смещений участка массива.



Рисунок 4.7 – График скорости смещения массива горных пород №5 (от 14.10.2020) с выставленным критическим значением

Из графика скорости на рисунке 4.7 следует, что сигнал тревоги второго уровня сработал заранее и не отключался долгое время после обрушения. 10 октября около 16 часов произошел незначительный вывал пород, о чем свидетельствует повышение скорости до 3,7 мм/ч. Сигнал тревоги 4 уровня сработал приблизительно за 30 минут до вывала горных пород. После незначительного вывала скорость смещения массива постепенно снижалась и с 11 октября до 12 октября держалась в районе 1 – 1,1 мм/ч. 12 октября скорость превысила 2 мм/ч, а 13 октября стала выше критической скорости 3 мм/ч после чего началось постепенное разрушение массива.

Из приведенных выше графиков скорости видно, что во всех случаях после превышения критической скорости в 3 мм/ч через определенные моменты времени происходит обрушение участка массива. Однако в случаях для обрушений №6, №19 и №20, которые происходили в скальных массивах и

отнесены к третьей группе обрушений, время после превышения критической скорости составляло 1 час 10 минут, 3 часа и 1 час соответственно. Этого времени может не хватить для принятия решения об остановке горных работ, вывода персонала и эвакуации техники, а, следовательно, порог критической скорости должен быть уменьшен.

Из графиков на рисунках 4,3, 4,4 и 4.6 видно, что процесс разрушения разделен на этапы, которые характеризуются своими скоростями. На рисунке 4.8 показан график скорости смещения массива обрушения №20 (от 08.10.2018 г.) с этапами разрушения.

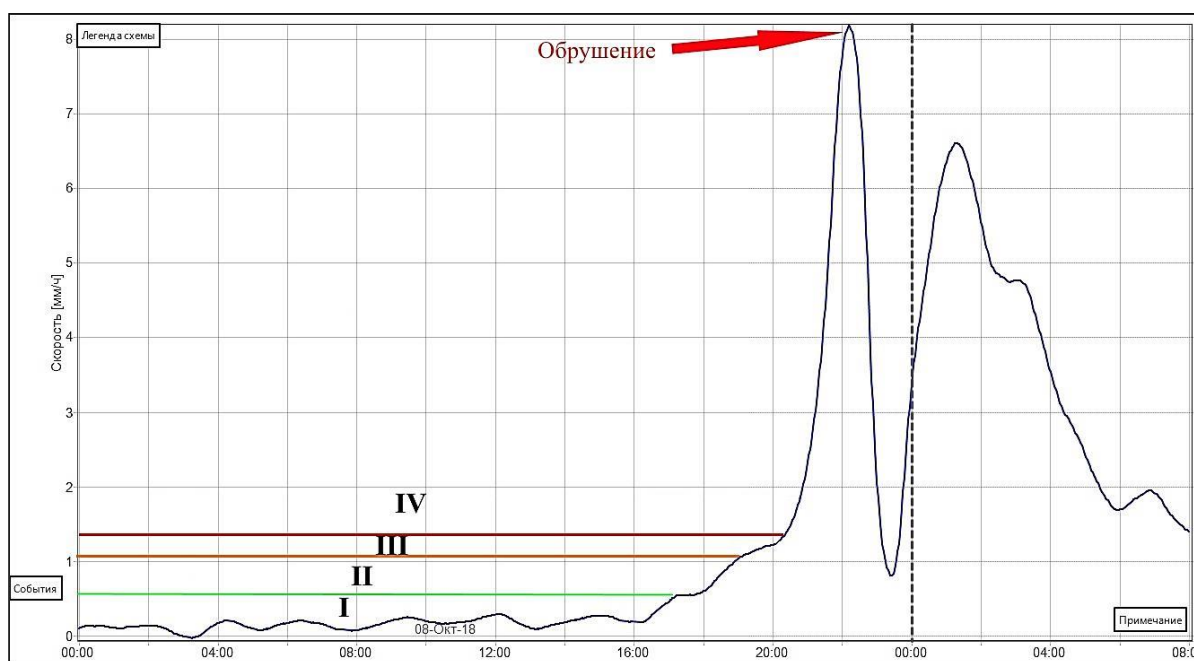


Рисунок 4.8 – График скорости смещения массива обрушения №20 (от 08.10.2018 г.) с этапами разрушения

Первый этап характеризуется увеличением скорости до 0,5 мм/ч и дальнейшим развитием процесса разрушения с постоянной скоростью. Второй этап – увеличение скорости от 0,5 до 1,1 мм/ч. На третьем этапе скорость возрастает до 1,4 мм/ч. Четвертый этап характеризуется резким увеличением скорости и заканчивается в момент обрушения.

На рисунке 4.9 показан график скорости смещения массива обрушения №19 (от 16.10.2018 г.) с этапами разрушения.

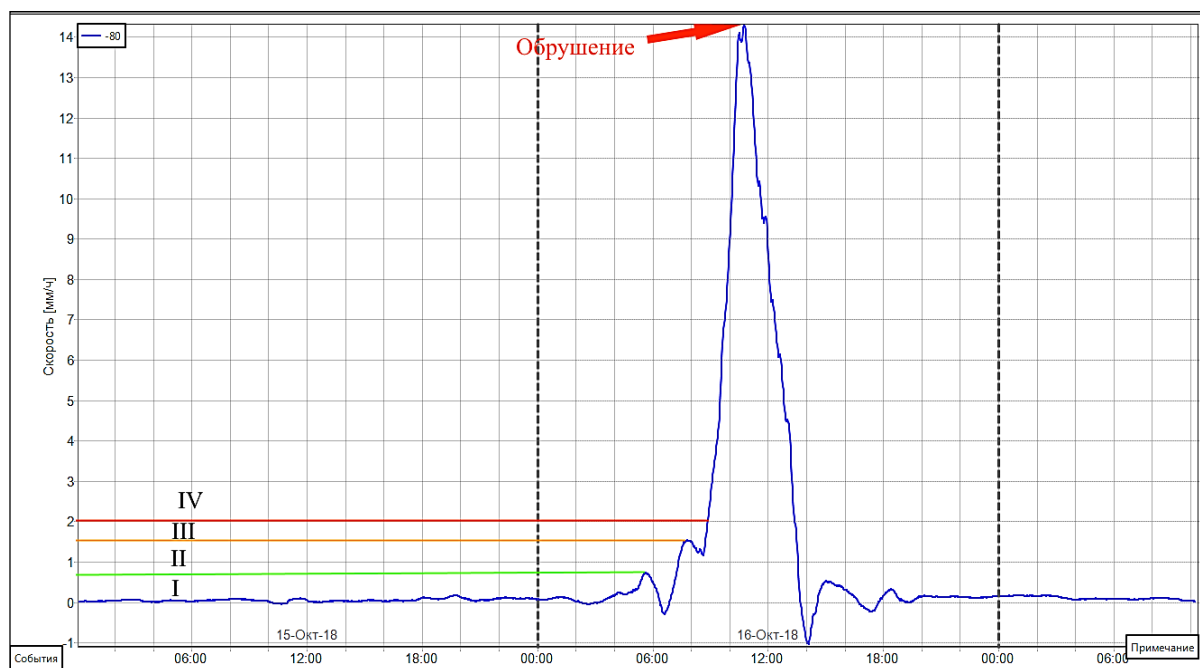


Рисунок 4.9 - График скорости смещения массива обрушения №19 (от 16.10.2018 г.) с этапами разрушения

На втором графике также выделяется 4 этапа. Первый этап характеризуется увеличением скорости до 0,8 мм/ч. На втором этапе происходит сначала снижение скорости практически до 0, а после этого заметное увеличение скорости до 1,5 мм/ч. На третьем этапе скорость также уменьшается до 1,1 мм/ч, а затем практически мгновенно увеличивается до 2 мм/ч. На четвертом этапе скорость продолжает увеличиваться до момента обрушения.

На рисунке 4.10 показан график скорости смещения массива горных пород №6 (от 27.08.2020 г.) с этапами разрушения.

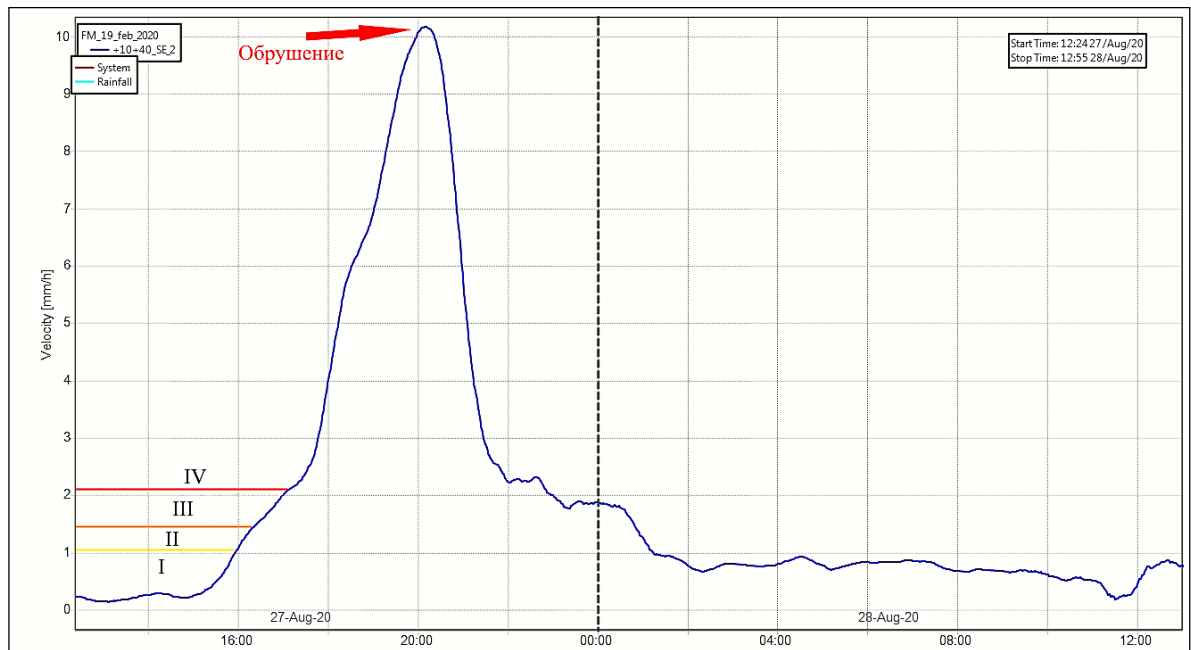


Рисунок 4.10 – График скорости смещения массива горных пород №6 (от 27.08.2020 г.) с этапами разрушения

На третьем графике аналогично выделяется 4 этапа. Первый этап характеризуется увеличением скорости до 1,1 мм/ч. На втором этапе происходит увеличение скорости до 1,5 мм/ч. На третьем этапе до 2,1 мм/ч. На четвертом этапе скорость продолжает увеличиваться до момента обрушения.

Учитывая данные о случаях потери устойчивости, произошедших 08.10.2018, 16.10.2018 и 27.08.2020 г.г., было определено, что значение критической скорости 3 мм/ч является достоверным, однако для обрушений, относящихся к 3 группе по кинематическому параметру «скорость смещения» целесообразнее принять критическую скорость смещения массива - 2 мм/ч. Это позволит раньше предупредить оператора об опасности и даст больше времени на эвакуацию рабочего персонала.

По результатам данного анализа были составлены 2 инструкции по работе с радаром IBIS FM: «Временная инструкция по наблюдению за деформациями бортов и откосов уступов карьера с помощью радара IBIS FM» и «Инструкция по выявлению неустойчивых участков борта карьера с помощью наземных радаров для работников диспетчерской службы карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК».

4.2 Проверка достоверности установленной критической скорости смещения массива горных пород

Так как речь в настоящем исследовании идет о безопасном ведении горных работ, то работа по сбору и анализу данных была продолжена. Основной задачей дальнейшего сбора информации являлась проверка достоверности установленной критической скорости смещения массива горных пород и при необходимости редакция инструкций по безопасному ведению горных работ.

В декабре 2020 года парк радарной техники в карьере «Железный» был пополнен 3 мобильными радарами IBIS ArcSAR с дальностью до 5000 метров и возможностью съемки на 360°. Кроме того, был укомплектован штат геомеханической службы и разработаны механизмы по документации всех зафиксированных случаев потери устойчивости. Все это позволило фиксировать и документировать события практически на любом участке борта карьера.

В предыдущем параграфе были приведены 7 из 22 рассмотренных обрушений. Остальные 15 случаев, которые происходили в карьере «Железный» за период с октября 2020 по 30 мая 2023 г.г. были проанализированы для проверки достоверности критического значения скорости смещения 2 мм/ч. Во всех случаях, за исключением одного, после превышения критической скорости происходили обрушения. Для начала приведем несколько примеров успешной работы системы оповещения для каждой из трех выделенных ранее групп обрушений.

Первый пример – обрушение №4, которое произошло 30 апреля 2021 года на южном участке борта гор. +322 – +262 м объемом около 30 000 м³. Участок борта сложен фенитами по всей части обрушения. Фениты темно-серые, зеленовато-серые, мелко-среднезернистые, трещиноватые, ослюденелые. На рисунке 4.11 показана карта скорости с выделенной областью обрушения, а на рисунке 4.12 график скорости смещения данной области. Тип обрушения – оползень.

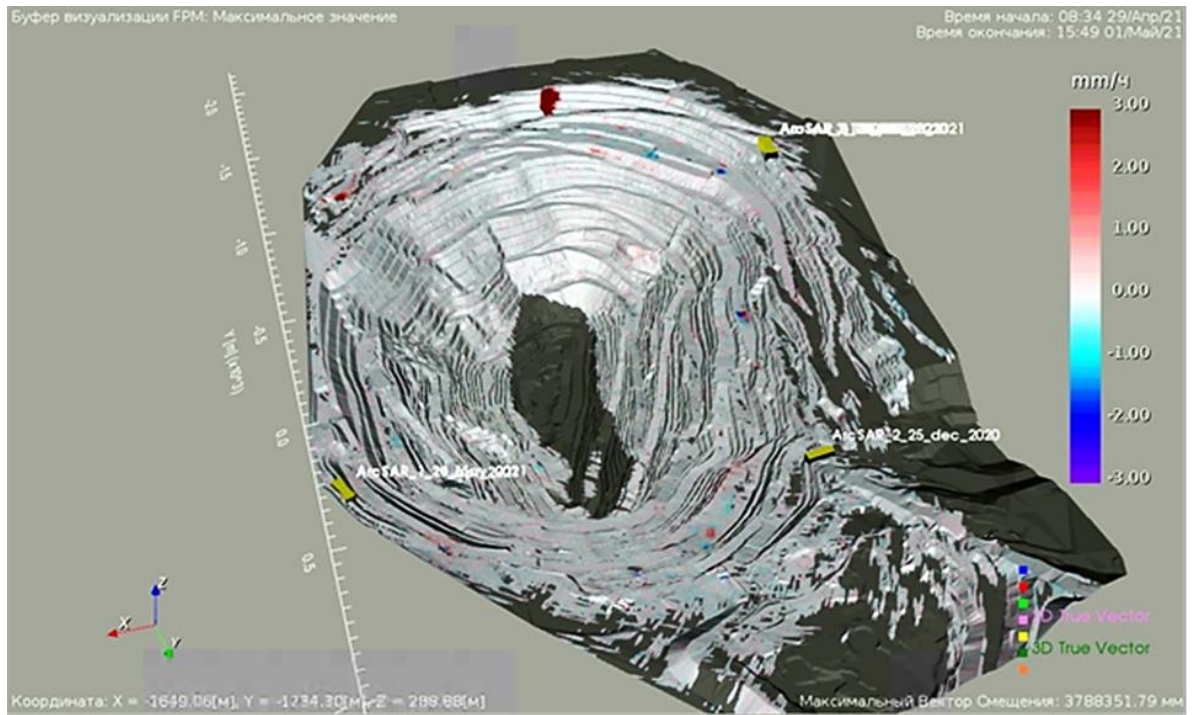


Рисунок 4.11 – Область обрушения на южном участке борта гор. +322 – +262 м.

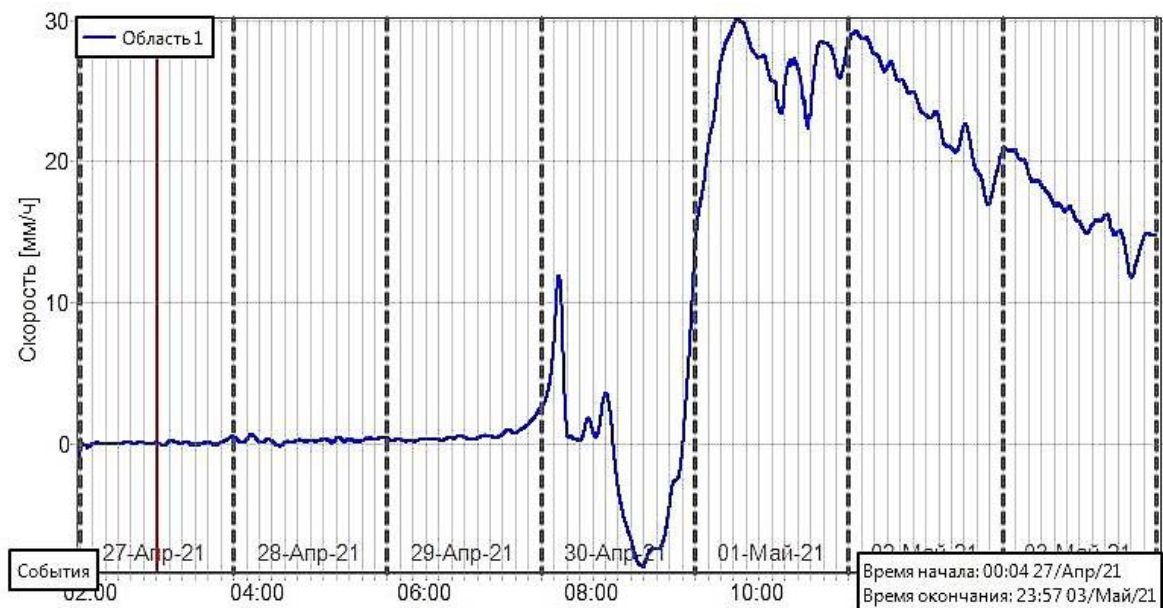


Рисунок 4.12 - График скорости смещения области на южном участке борта гор. +322 – +262 м.

Основной этап обрушения произошел 30 апреля 2021 г. в 3.00. Для более детального обзора на рисунке 4.13 показан график скорости смещения данного обрушения за период 29 апреля - 30 апреля 2021 г. с указанным критическим значением скорости.

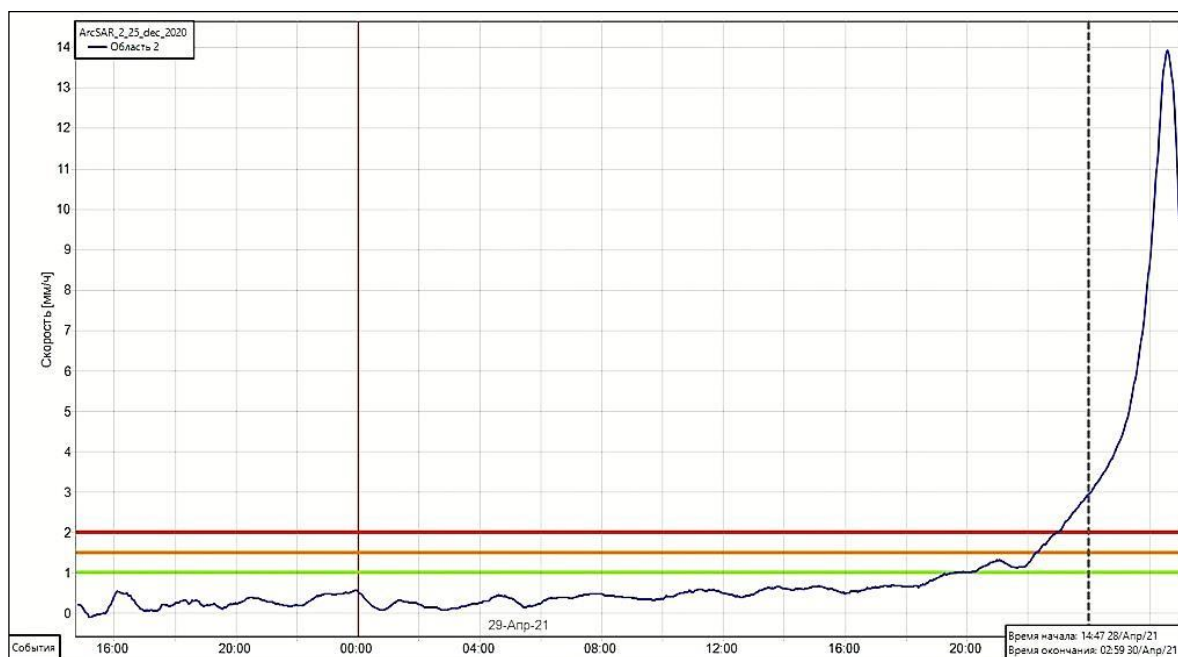


Рисунок 4.13 - График скорости смещения обрушения №4 за период 29 - 30 апреля 2021 г. с указанным критическим значением скорости

Активное смещение участка борта началось приблизительно в 10 часов 29 апреля, скорость смещения на тот момент составляла всего 0,5 мм/ч. С этого момента времени скорость начала увеличиваться и к 23:00 превысила предельное значение скорости в 2 мм/ч. Обрушение произошло приблизительно в 3:00 30 апреля, т.е. через 4 часа после превышения предельного значения скорости смещения.

В данном случае необходимо отметить сотрудников геомеханической службы, которые действовали строго по составленной инструкции и вовремя закрыли участок, ведь непосредственно под обрушением находилась транспортная берма. На рисунке 4.14 результат реализованного обрушения.



Рисунок 4.14 – Обрушение №4 в карьере «Железный» от 30 апреля 2021 года

Ярким примером успешного прогноза обрушения второй группы является обрушение №2, которое произошло 28.09.2022 г. на северо-восточном участке борта карьера гор. +130 – +70 м объемом до 5 000 м³. На рисунке 4.15 показана карта скорости с выделенной красным цветом областью обрушения, а на рисунке 4.16 график скорости смещения данной области с указанным критическим значением.

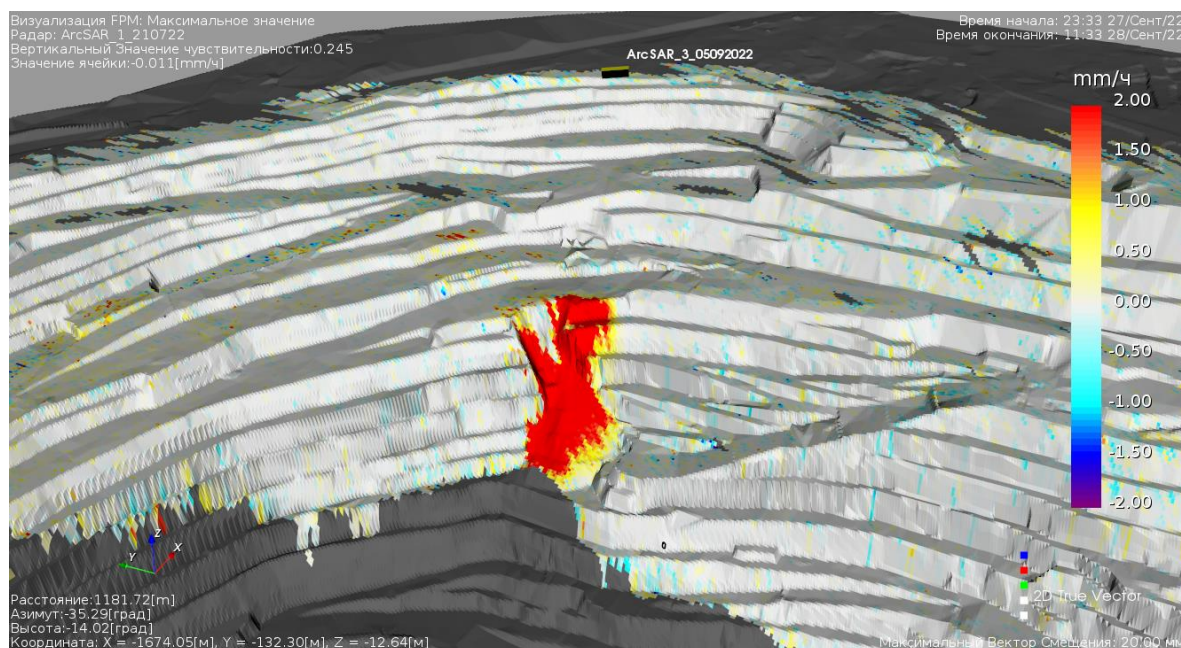


Рисунок 4.15 – Область обрушения на северо-восточном участке борта карьера гор. +130 – +70 м.

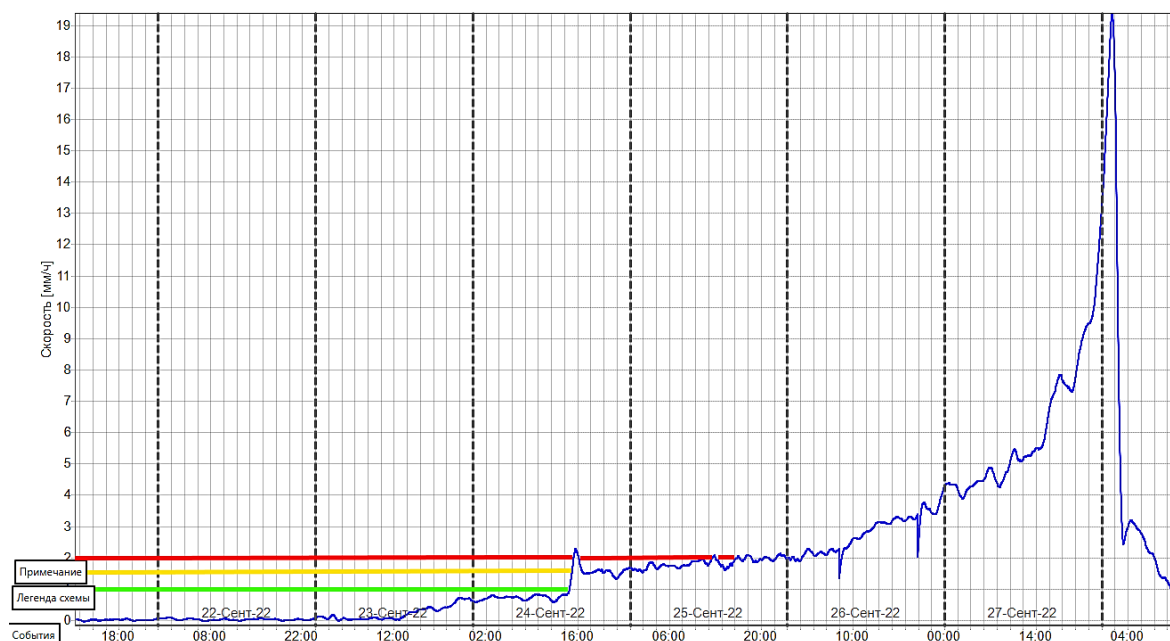


Рисунок 4.16 – График скорости смещения области на северо-восточном участке борта карьера гор. +130 – +70 м с указанным критическим значением

По данным Геомеханической службы данный участок борта карьера сложен пироксенитами зеленовато-серого цвета, пронизанными многочисленными карбонатитовыми прожилками и разбитыми трещиноватостью 3-4 порядков на блоки размером от 0.4 до 1м. Были выявлены следующие признаки процессов разрушения: трещины отрыва на всю длину призмы обрушения и проседания

поверхности обрушения до 2 метров по горизонту +130 м. С горизонта +130, +118, +94 м наблюдались вывалы и осыпи рыхлой и скальной массы размерностью кусков до 5 м в активную фазу обрушения.

Анализ графика скорости смещения показывает, что процесс разрушения участка борта начался около 12:00 23 сентября 2022 г., а 24 сентября, после проведения взрывных работ в непосредственной близости от данного участка, ускорился, о чем свидетельствует резкое увеличение скорости около 16:00 24 сентября (максимальное значение 2,2 мм/ч). В дальнейшем скорость плавно нарастала и сопровождалась осыпанием горной массы высокой интенсивности. Обрушение произошло в 2:30 28.09.2022 г. Система оповещения радарного мониторинга предупредила персонал почти за 82 часа до момента обрушения. На рисунке 4.18 представлен результат реализации обрушения.



Рисунок 4.18 – Обрушение №2 в карьере «Железный» от 28 сентября 2022 года

В качестве примера успешного прогноза обрушения третьей группы приведем обрушение №9, которое произошло 05.11.2022 г. на юго-западном участке борта гор. +10 - 20 м. Объем обрушения составил 150 м³. На рисунке 4.19

показана карта скорости с выделенной областью обрушения, а на рисунке 4.20 график скорости смещения данной области с указанным критическим значением.

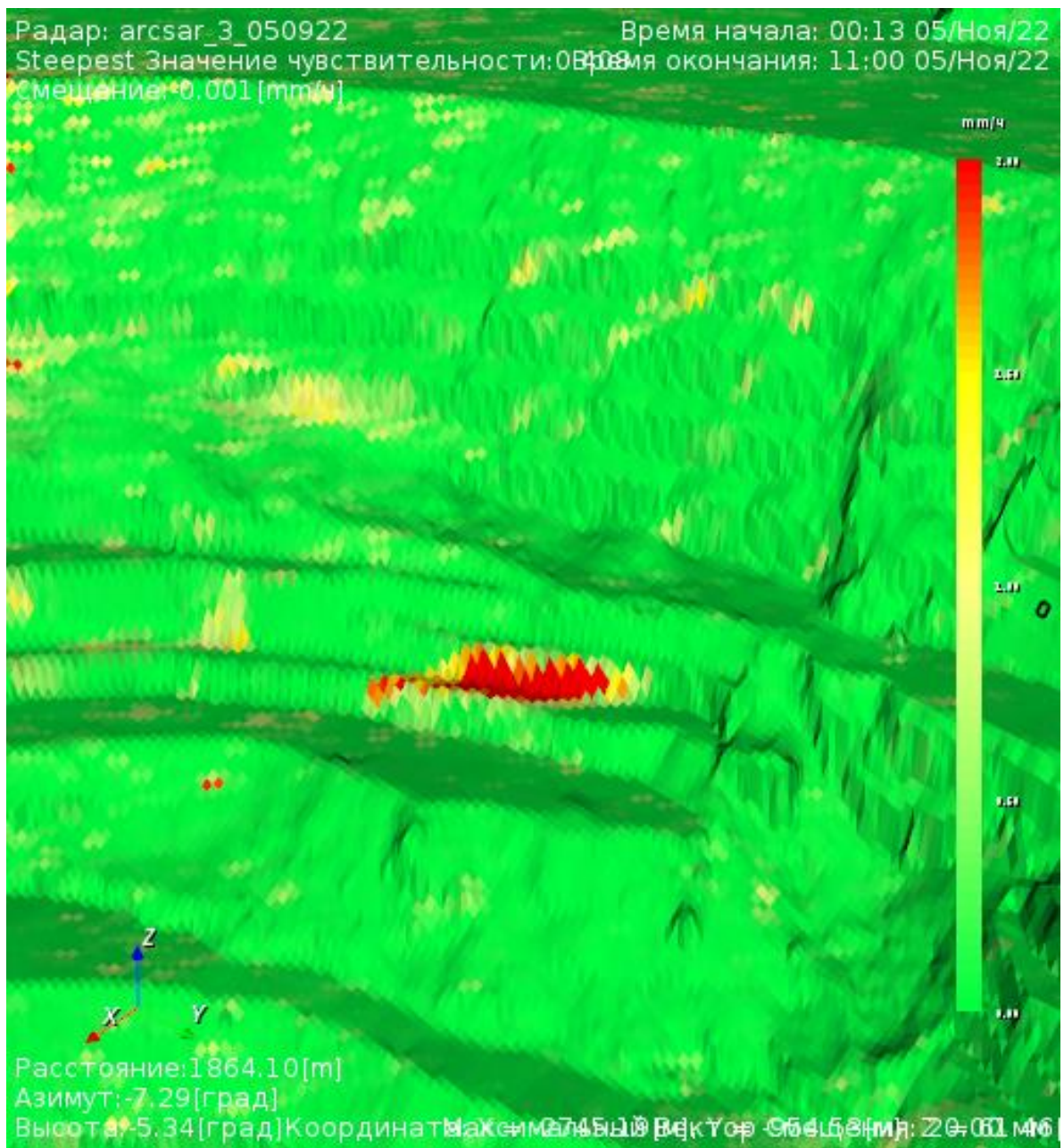


Рисунок 4.19 – Область обрушения на юго-западном участке борта карьера гор. +10 -20 м.

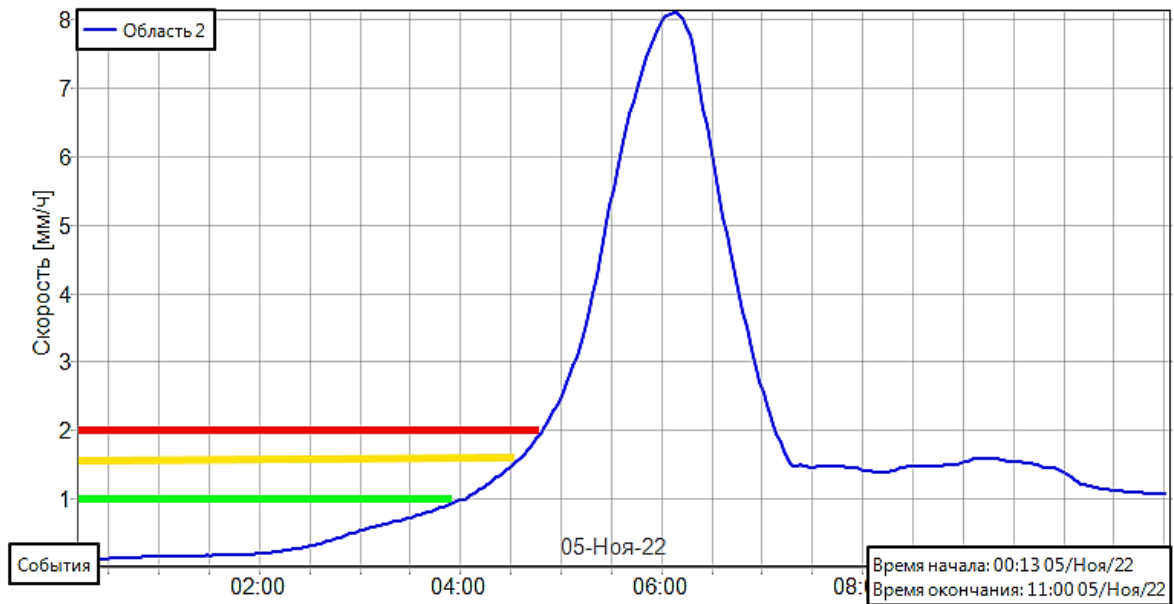


Рисунок 4.20 – График скорости смещения области на юго-западном участке борта карьера гор. +10 -20 м с указанным критическим значением

Анализ графика скорости смещения показывает, что процесс разрушения участка борта начался около 0 ч 30 минут 05ноября и в 4 ч 45 мин скорость смещения достигла критической величины 2 мм/ч. Через 1 час 30 минут произошло обрушение. Результат реализации обрушения представлен на рисунке 4.21.

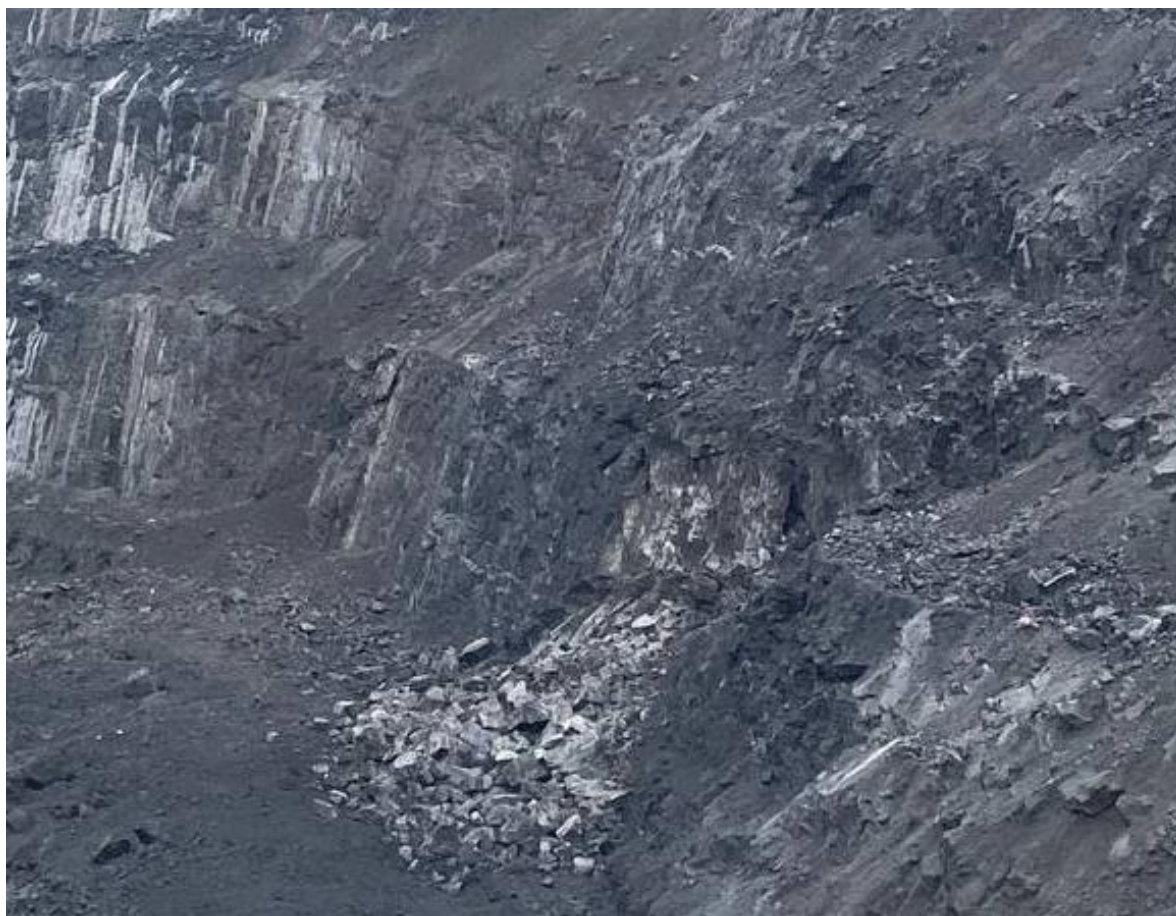


Рисунок 4.21 – Обрушение №9 в карьере «Железный» от 05 ноября 2022 года

Ранее указывалось, что во всех случаях рассматриваемых обрушений, за исключением одного, после превышения критической скорости происходили обрушения. Данное обрушение произошло 31.05.2022 г. на восточном участке борта карьера гор. +258 – +202 м объемом до 130 000 м³ (обрушение №3). На рисунке 4.22 показана карта скорости с выделенной красным цветом областью обрушения, а на рисунке 4.23 график скорости смещения данной области.

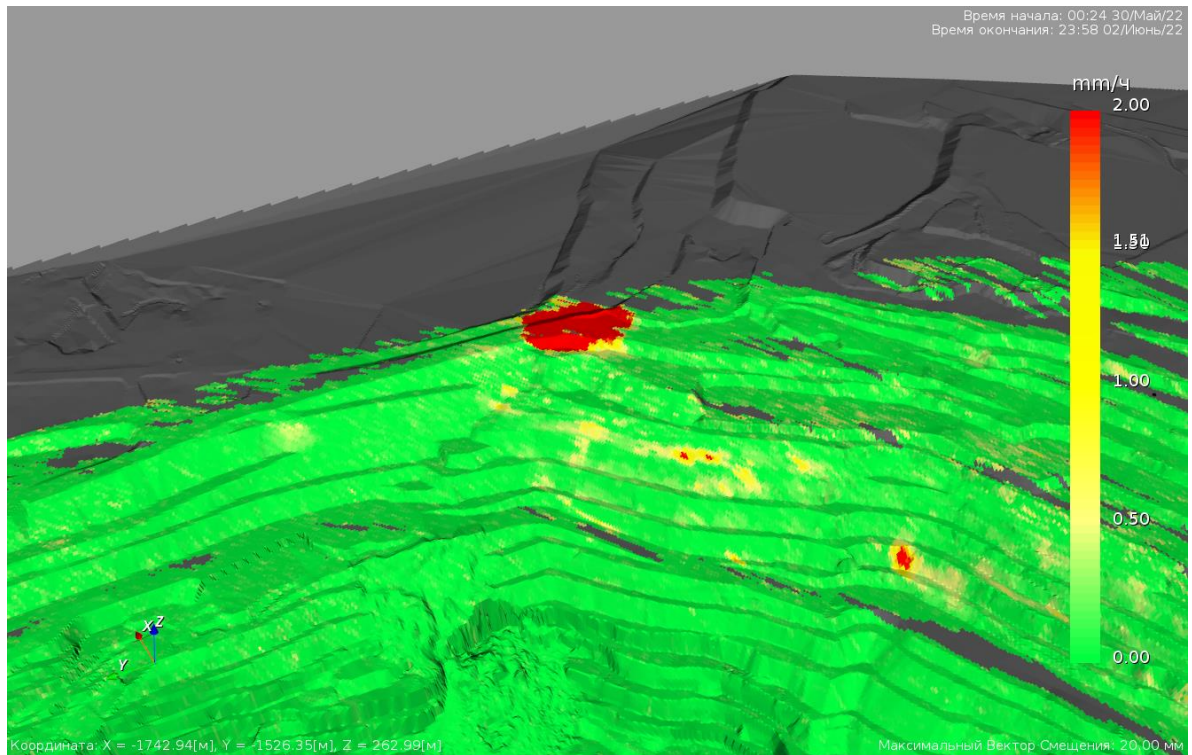


Рисунок 4.22 – Область обрушения на восточном участке борта карьера гор. +258 – +202 м.

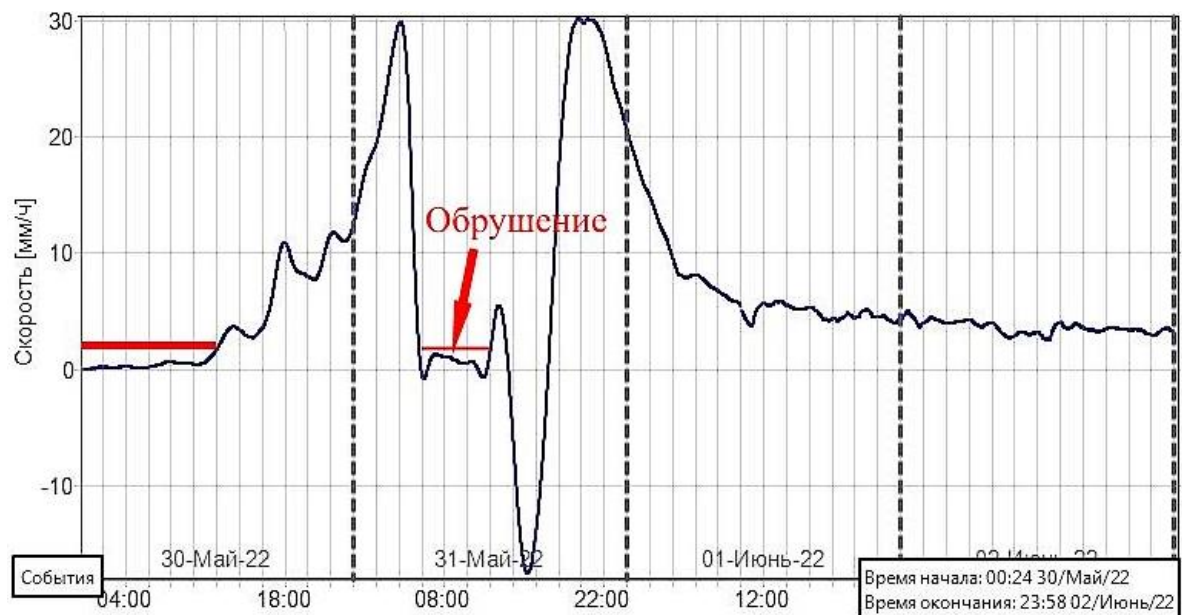


Рисунок 4.23 – График скорости смещения массива горных пород на восточном участке борта карьера гор. +258 – +202 м с указанным критическим значением

По данным Геомеханической службы участок сложен частично дезинтегрированными горными породами фенитами, ийолитами и пироксенитами. Верхняя часть участка обрушения сложена мореной и насыпным грунтом. Также были выявлены следующие признаки обрушения: трещины

отрыва на всю длину призмы обрушения и проседания поверхности обрушения до 5 метров, частичное разрушение дороги, мелкие трещины в 10 метрах от здания корпуса среднего и мелкого дробления (КСМД). Наблюдались вывалы и осыпи рыхлой и скальной массы с горизонта +202 м, при этом размерность кусков достигала до 7 м в активную фазу обрушения. По данным радарного мониторинга и визуального обследования установлен тип обрушения – оползень-обрушение.

Активное смещение участка борта началось приблизительно в 08 ч. 00 мин. 30 мая 2022 года, а около 12 часов скорость уже превысила критическое значение 2 мм/ч и продолжила нарастать. Около 04 ч. 00 мин. 31 мая скорость достигла максимального значения, при этом на всем временном отрезке наблюдалось осыпание рыхлой горной массы средней интенсивности, однако обрушение не произошло и к 08 ч. 00 мин. значение скорости приблизилось к 0. По всей видимости, произошло зависание массива горных пород, что хорошо показано на графике скорости смещений с 04 ч. 00 мин. до 08 ч. 00 мин. 31 мая 2022 г. После этого в 09 ч. 40 мин. произошло резкое обрушение массива. В дальнейшем на данном участке также фиксировалось осыпание рыхлой горной массы средней интенсивности, о чем свидетельствуют высокие значения скорости смещения.

Подобные случаи «зависания» горных пород перед обрушением происходят достаточно редко и могут представлять значительную опасность, т.к. при замедлении скорости смещения массива практически до 0 можно ошибочно предположить, что процесс разрушения окончен. Результат реализации обрушения представлен на рисунке 4.24.



Рисунок 4.24 – Обрушение №3 в карьере «Железный» от 31 мая 2022 года

В результате проверки достоверности установленной критической скорости смещения массива горных пород установлено, что 21 рассмотренный случай обрушений из 22 реализовывались при превышении критической скорости в 2 мм/ч и только в одном случае (менее 5%) наблюдалось отклонение. Следовательно, можно сделать вывод о том, что для условий массивов прочных скальных пород скорость смещения 2 мм/ч является критической для реализации обрушения вне зависимости от той кинематической группы, к которой относится обрушение.

Выводы к главе 4

Для безопасного ведения открытых горных работ в карьере «Железный» необходимо установить критическое значение скорости смещения массива. Под критическим значением скорости смещения подразумевается скорость смещения, при превышении которой обрушение неизбежно произойдет.

Определение критической скорости проводилось в несколько этапов. На первом этапе были проанализированы 2 обрушения за период 2014-2015 г.г. и по данным об обрушении от 24 августа 2015 года сделано предположение о том, что ключевым индикатором скорого обрушения можно считать резкое увеличение скорости от 1 до 3 мм/ч, а скорость 3 мм/ч может являться критической для реализации обрушения.

На втором этапе анализировались данные об обрушениях за период с октября 2018 по август 2020 г.г. и было установлено, что значение критической скорости 3 мм/ч является достоверным, однако для обрушений, относящихся к 3 группе по кинематическому параметру «скорость смещения» целесообразнее принять критическую скорость смещения массива - 2 мм/ч. Это позволит раньше предупредить оператора об опасности и даст больше времени на эвакуацию рабочего персонала.

По результатам данного анализа были составлены 2 инструкции по работе с радаром IBIS FM: «Временная инструкция по наблюдению за деформациями бортов и откосов уступов карьера с помощью радара IBIS FM» и «Инструкция по выявлению неустойчивых участков борта карьера с помощью наземных радаров для работников диспетчерской службы карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК».

На третьем этапе для проверки достоверности установленной критической скорости смещения массива горных пород анализировались данные за период с октября 2020 года по май 2023 года. Из 15 случаев, которые происходили в карьере «Железный» за данный период, во всех случаях, за исключением одного,

после превышения критической скорости 2 мм/ч происходили обрушения. Показано, что данная критическая скорость достоверна для всех трех кинематических групп, выделенных ранее.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что **для условий массивов прочных скальных пород скорость смещения 2 мм/ч является критической для реализации обрушения вне зависимости от той кинематической группы к которой относиться обрушение.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день многие крупные карьеры в России и мире уже превышают глубины 500 метров. Такие глубокие горизонты характеризуются действием более высоких напряжений, изменяются гидрогеологические условия отработки месторождения, а также деформационно-прочностные свойства массивов горных пород. В результате проблемы, связанные с обеспечением устойчивости бортов и уступов карьеров, становятся все более актуальными.

Для проведения необходимых мероприятий по обеспечению устойчивости бортов и уступов карьера необходимо получать достоверную информацию об изменениях свойств массива горных пород, а также выявлять потенциально неустойчивые участки карьера. Все вышесказанное невозможно проводить без организации комплексной системы мониторинга состояния массива горных пород.

Геомеханический мониторинг состояния массива сводится к наблюдению за геомеханическим состоянием объекта и прогнозированию момента перехода его в предельное состояние. Последнее невозможно без определения критических значений кинематических параметров обрушений, таких как смещение или их производных (скорости и ускорения).

Существует несколько способов определения критических значений кинематических параметров. Один из самых достоверных методов — это выявления эмпирических закономерностей, полученных при анализе результатов полевых наблюдений за обрушениями. При этом самым эффективным методом наблюдений за состоянием массива до обрушения и вовремя активной стадии является метод радарного наземного мониторинга.

Для анализа кинематических параметров были собраны и проанализированы данные о случаях обрушений в карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК» за период с 2014 по 2023 г.г. Всего выбрано 22 случая потери устойчивости, которые являются задокументированными сотрудниками Геомеханической службы и по всем этим случаям есть данные радарного

мониторинга о смещениях, скоростях и ускорениях. Первой задачей анализа данных являлось установление параметра, по которому будет осуществляться дальнейших прогноз состояния массива.

В результате выполненного анализа данных получены следующие научные выводы и практические результаты:

1. Кинематический параметр «скорость смещения» является наиболее подходящим для оценки состояния массива горных пород и прогноза вероятного обрушения в условиях Ковдорского месторождения, т.к. графики скорости склонны к достаточно плавному нарастанию и падению, а обрушение происходит при ярко выраженном максимальном значении.

2. Все зафиксированные обрушения можно разделить на 3 группы по характеру развития процесса разрушения. Каждая выделенная группа характеризуется типичными графиками нарастания скорости смещения массива, а также временем реализации обрушения.

В первую группу выделены все зафиксированные оползни-обрушения. Особенности данной группы является довольно резкое нарастание скорости, которое сопровождается осыпанием горной массы средней и высокой интенсивности, а также временем реализации обрушения, которое в среднем составляет 25 часов.

Во вторую группу выделены обрушения, которые происходили в сильнотрещиноватом (дезинтегрированном) массиве скальных пород. Они характеризуются плавным нарастанием скорости, которое может продолжаться от нескольких часов до нескольких дней. Среднее время реализации обрушения данной группы составляет 103 часа (больше 4 суток).

Третья группа обрушений, также как вторая, фиксируется в массивах скальных горных пород. В отличие от второй группы данные обрушения происходят в мало трещиноватом массиве. Скорость смещения в данном случае увеличивается достаточно быстро, а в среднее значение времени реализации составляет 8 часов.

3. Установлено, что для условий массивов прочных скальных пород скорость смещения 2 мм/ч является критической для реализации обрушения вне зависимости от той кинематической группы, к которой относится обрушение.

Установление значений критической скорости происходило в 3 этапа. На первом этапе были проанализированы 2 обрушения за период 2014-2015 г.г. и выдвинуто предположение о критическом значении скорости смещения. На втором этапе анализировались данные об обрушениях за период с октября 2018 по август 2020 г.г. и результатом послужило установление критического значения скорости смещения 2 мм/ч. На третьем этапе, для проверки достоверности установленной критической скорости смещения массива горных пород, анализировались данные за период с октября 2020 по май 2023 г.г.. Показано, что данная критическая скорость достоверна для всех трех кинематических групп, выделенных ранее.

4. Разработана «Временная инструкция по наблюдению за деформациями бортов и откосов уступов карьера с помощью радара IBIS FM».

5. Разработана «Инструкция по выявлению неустойчивых участков борта карьера с помощью наземных радаров для работников диспетчерской службы карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК».

На сегодняшний день результаты исследования используются в инструкции по безопасному ведению горных работ в карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК».

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельников, Н.Н. Изменение геодинамического режима геологической среды при ведении крупномасштабных горных работ / Н.Н.Мельников, А.А. Козырев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. - Специальный выпуск. - С. 7-22;
2. <https://oko-planet.su/pogoda/newspogoda/183349-ssha-massivnyy-opolzen-ostanovil-proizvodstvo-v-bingem-kanon.html>;
3. Саркулов, Т.С. Оценка устойчивости бортов карьера по данным натурных наблюдений // Горный журнал. - 2005. - № 6. - С. 22-24;
4. Исмаилов, А.С. Особенности процесса длительного деформирования массивов скальных пород и их мониторинг при отработке глубоких карьеров / А.С. Исмаилов, А.Д. Меликулов, Ш.М. Садинов, К.С. Султанов, К.Д. Салямова, Н.Ю. Гасанова // Проблемы недропользования. - 2016. - № 3. - С. 18-23;
5. Полищук С.З. Прогноз устойчивости и оптимизация параметров бортов глубоких карьеров / С.З. Полищук, В.Т. Лашко, П.А. Шеметов и др. – Днепропетровск: Полиграфист, 2001. - С. 371;
6. Галустьян Э. Л. Условия формирования бортов карьеров и обеспечение их устойчивости / Э.Л. Галустьян, В.Л. Рыбак // Горный журнал. - № 8. - 1999. - С. 26-28;
7. Kozyrev, Anatoly A. Analysis of stability loss in open-pit slopes and assessment principles for hard, tectonically-stressed rock masses / Anatoly A. Kozyrev, Sergei P. Reshetnyak, Victor A. Maltsev, Vadim V. Rybin // Slope stability in Surface Mining – Littleton, Colorado, USA. – Publ. by SME, 2001, chapter 27, pp. 251-256;
8. Розанов, И. Ю. Применение радара IBIS FM для контроля состояния борта карьера рудника «Железный» (АО «Ковдорский ГОК»). / И.Ю. Розанов, А.А. Завьялов // ГИАБ. - № 7. - 2018. - С. 40-46;

9. Rozanov I., Zavialov A. (2019) Determination of Critical Deformation and Destruction Parameters of the Zhelezny Open Pit Rock Mass (JSC Kovdorsky GOK) Based on IBIS FM Ground Radar Data. Trigger Effects in Geosystems. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham;

10. Ридель, И.А. «Экологический мониторинг на лицензионных участках ООО «Газпром добыча Ноябрьск» / И.А. Ридель, М.В. Медведев, А.В. Дудин, Т.А. Ляшко // Газовая промышленность. - № 2. - 2015. - С. 98-101;

11. Mann R.E. Global Environmental Monitoring System / R.E. Mann // SCOPE, Rep.3 – Toronto, 1973;

12. Израэль, Ю.А. Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка изменения состояния окружающей природной среды. Основы мониторинга / Ю.А. Израэль // «Метеорология и гидрология». - 1974. - № 7. - С. 3-8;

13. Израэль, Ю.А. Концепция мониторинга состояния биосферы. / Ю.А. Израэль // Труды 1 советско-английского симпозиума «Мониторинг состояния окружающей природной среды». – Кардингтон, Англия. 29 ноября - 1 декабря 1976. - С. 10-25;

14. Бахурин, И.М. Сдвижение горных пород под влиянием горных разработок / И. М. Бахурин. - М. - Л.: Гостопиздат, 1946. - 229 с.

15. Леонтовский, П.М. Литература об обрушении и оседании пород в рудниках и о влиянии их на дневную поверхность / П.М. Леонтовский. - Екатеринослав: б. и., 1912. - 20 с.

16. Авершин, С.Г. Сдвижение горных пород при подземных разработках [Текст] / С. Г. Авершин. - М.: Углетехиздат, 1947. - 245 с.

17. Маркшейдерский справочник . - М. - Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1938. - 734 с.

18. Авершин, С.Г. Обработка и использование результатов наблюдений за сдвижением поверхности / С.Г. Авершин. - М.: Гостоптехиздат, 1941. — 225 с.

19. Справочник маркшейдера / Д. Н. Оглоблин и др. - М.: Metallurgizdat, 1955. - 927 с.;
20. Фисенко, Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов / Г.Л. Фисенко. - М.: Недра, 1965. - 378 с.;
21. Попов, В.Н. Исследование устойчивости бортов карьеров в трещиноватых породах: автореф. дис.... д-ра техн. наук: 05.15.01 / Попов Владислав Николаевич. - М., 1979. - 37 с.;
22. Демин, А.М. Закономерности проявлений деформаций откосов в карьерах / А.М. Демин. - М.: Наука, 1981. - 143 с.;
23. Ильин, А.И. Управление долговременной устойчивостью откосов на карьерах / А.И. Ильин, А.М. Гальперин, В.И. Стрельцов. - М.: Недра, 1985.- 248 с.;
24. Попов, И.И. Механика скальных массивов и устойчивость карьерных откосов / И.И. Попов, Р.П. Окатов, Ф.И. Низаметдинов. - Алма-Ата: Наука, 1986.- 256 с.;
25. Ильин, А.И. Геолого-маркшейдерское обеспечение управления устойчивостью бортов глубоких железорудных карьеров: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.15.01; 05.15.15 / Попов Александр Иванович; МГИ. - М., 1988. - 41 с.
26. Попов, В.Н. Технология отстройки бортов карьеров / В.Н. Попов, Б.Н. Байков. - М.: Недра, 1991. - 252 с.;
27. Методические указания по производству маркшейдерских наблюдений за оползневыми явлениями на угольных карьерах. – Углетехиздат: М., 1955;
28. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости / под ред. Фисенко Г.Л. – Л.: ВНИМИ, 1971. – 186 с.;
29. Макаров, А.Б. Управление устойчивостью бортов карьеров как основа обеспечения ответа на глобальные вызовы / А.Б. Макаров, И.С. Ливинский, В.И.

Спирин, А.А. Павлович // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2021, Вып. 3. – С. 188-202. – DOI: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-182-196;

30. Рыльникова, М.В. Особенности и перспективы реализации проекта федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов» / М.В. Рыльникова, А.И. Перепелицын, О.В. Зотеев, И.Л. Никифорова // «Горная промышленность» – №1 – 2020. – С. 132-139 – DOI 10.30686/1609-9192-2020-1-132-139;

31. Ильясов, Б.Т. Исследование кинетики деформаций массива горных пород с использованием метода конечно-дискретных элементов / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 25.00.16 / Ильясов Булат Тагирович // ФГБОУ ВО Уральский государственный горный университет. Екатеринбург, 2016. – 22 с.;

32. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов / С.С. Вялов // М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.;

33. Сапожников, В. Т. Характер деформирования бортов уральских разрезов в околопредельном состоянии / В.Т. Сапожников, Д.Н. Ким, Б.Г. Афанасьев //Труды ВНИМИ. – 1985. – С. 64-71;

34. Туринцев, Ю.И. Геомеханические основы прогноза устойчивости карьерных откосов / Ю.И. Туринцев // Изв. вузов. Горный журнал. – 1992. – № 9. – С.84-87;

35. Мочалов, А.М. Оценка устойчивости бортов карьеров по наблюдаемым деформациям / А.М. Мочалов // Труды ВНИМИ. – 1985. – С. 42-52;

36. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости / Г.Л. Фисенко, А.М. Мочалов, Ю.Н. Гавриленко, Л.В. Фомичев, В.Т. Сапожников, Г.В. Созыкин, С.Р. Рейзвих // Л.: ВНИМИ, 1987. – 113 с.;

37. Мочалов, А.М. Прогнозирование деформаций прибортовых массивов карьеров по результатам наблюдений и моделирования откосов / А.М. Мочалов // Труды ВНИМИ. – 1991. – С. 119-124;
38. Reik, C. The Use of equivalent models in slope stability investigation / C. Reik, Chr. Teutsch // Int. J. Rock. Min. Sci. & Geomech. Abstr. – 1976. – № 13. – P. 321- 330;
39. Jing, L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering / L. Jing // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2003. – № 40. – P. 283-353;
40. Мочалов, А.М. Оценка устойчивости бортов карьеров по наблюдаемым деформациям / А.М. Мочалов // Труды ВНИМИ. – 1985. – С. 42-52;
41. Кашников, Ю.А. Численная модель для расчета напряженно-деформированного состояния горного массива и земной поверхности при добыче калийных руд / Ю.А. Кашников, С.Г. Ашихмин // Маркшейдерский вестник. – 2002. – № 3. – С. 41-46;
42. Gioda, G. A finite element solution of non-linear creep problems in rocks // Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geom. Abst. – 1981. – №18. – P. 35–46;
43. Desai, C. Constitutive modeling and analysis of creeping slopes / C. Desai, , N. Samtani, and L. Vulliet, // J. Geotech. Engrg.– 1995. – № 121(1);
44. UDEC – Universal Distinct Element Code, Ver. 6.0. / Itasca Consulting Group, Inc. – Minneapolis: Itasca, 2014;
45. Amitrano, D. Brittle creep, damage and time to failure in rocks / Amitrano D., Helmsetter A. // Journal of Geophysical Research B: Solid Earth. – 2006. – № 111;
46. Malan, D. F. Simulating the time-dependent behaviour of excavations in hard rock // Rock Mech. Rock Engng. – 2002. – № 35 (4). – P. 225-254;

47. Eberhardt, E. Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes – the 1991 Randa rockslide / E. Eberhardt, D. Stead, J.S. Coggan // Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. & Geom. Abst. – 2004. – № 41(1). – P. 69-87;

48. Long-term geomechanical stability analysis [e-book] / ITASCA CG. – 2011. – 139 p.;

49. Stead, D. Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modelling techniques / D. Stead, E. Eberhardt, J.S. Coggan // Eng. Geol. – 2006. – № 83(1-3). – P. 217-235;

50. Фисенко, Г. Л. Исследование деформационных свойств горных пород применительно к оценке устойчивости бортов карьеров / Г.Л. Фисенко, А.М. Мочалов, В.И. Веселков // Труды ВНИМИ. – 1973. – № 89. – С. 164-173;

51. <https://bigenc.ru/geography/text/2238756;>

52. Отчет Геологического института Кольского филиала АН СССР по теме: «Закономерность образования и размещения сульфидных медно-никелевых месторождений Кольского полуострова, оценка перспектив никеленосности и расширения сырьевой базы медно-никелевой промышленности» // Апатиты: Фонды КФ АН СССР, 1964;

53. Рыбин, В.В. Развитие теории геомеханического обоснования рациональных конструкций бортов карьеров в скальных тектонически напряженных породах / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 25.00.20 / Рыбин Вадим Вячеславович. - Гор. ин-т Кол. науч. центра РАН. Апатиты, 2016. – 383 с.;

54. Дунаев, В.А. Геолого-структурное картирование Ковдорского месторождения для решения геомеханических и горно-эксплуатационных задач с применением компьютерных технологий / В.А. Дунаев, С.С. Серый, А.В. Герасимов, С.Н. Журин, А.Н. Быховец, Б.В. Славский // Горный журнал. 1998. – № 4. – С.41-46;

55. Епифанова, М.В. Инженерно-геологические аспекты проектирования глубокого карьера Ковдорского ГОКа / М.В. Епифанова, С.А. Фёдоров, А.А. Козырев, В.В. Рыбин, Ю.И. Волков // Горный журнал. 2007. – № 9. – С. 30-33;

56. Серый, С.С. Методика и компьютерная технология геолого-структурного районирования массивов скальных пород на основе кластерного анализа / С.С. Серый // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. – № 5. – С.178-182;

57. Структурное инженерно-геологическое картирование Ковдорского месторождения с увязкой съемки карьера с данными по скважинам для расчета оптимальных углов наклона бортов перспективного карьера: Отчет о НИР (заключительный, х/д 3.12-3-И-53-90)/ НПО ВИОГЕМ / Отв. исполнитель В.А. Дунаев. – № ГР 01900009110. – Белгород, 1991. – 60 с.;

58. Быховец, А.Н. Геомеханическое и техническое обоснование оптимальных конструкций уступов и бортов основного карьера / А.Н. Быховец, Г.Е. Тарасов, А.А. Козырев, С.П. Решетняк, С.С. Серый, Н.В. Черевко // Горный журнал, 2002. – Спец. выпуск. – С.13-17;

59. Мелик-Гайказов, И В. Концепция долгосрочного развития Ковдорского ГОКа: «40+40» / И.В. Мелик-Гайказов, Ф.Б. Кампель, В.В. Берлович, А.П. Ивакин, Н.И. Бичук // Горный журнал. – 2002. – Спец. выпуск. – С. 6-12;

60. Изучение физико-механических свойств пород, слагающих борта карьера Ковдорского месторождения комплексных руд и определение углов наклона бортов в перспективных границах карьера: Отчет о НИР (закл., х/д №2188) / Горный институт КНЦ РАН; Отв. исполнители Г.А. Ковалева, Г.М. Еремин. – Апатиты, 1989. – 106 с.;

61. Еремин, Г.М. Совершенствование расчетных методов определения параметров откосов бортов глубоких карьеров / Г.М. Еремин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. – № 9. – С.133-137;

62. Изучение инженерно-геологических свойств породного массива Ковдорского комплексного месторождения, его напряженного состояния и определение углов наклона бортов перспективного карьера (вариант): Отчет о НИР (х/д 5-90-2191, 2691) / Горный институт КНЦ РАН; Руководители: А.А. Козырев, С.П. Решетняк. Исполнители Г.М. Еремин, В.В. Павлов. – Апатиты, 1992. – 159 с. (с приложениями);

63. Методические рекомендации по изучению напряженно-деформированного состояния горных пород на различных стадиях геологического процесса: Метод. Рекомендации / ВНИИ Геоинформсистем; Научн. редактор: Е.И. Шемякин; Сост. От КФАН СССР: Н.И. Белов, Ю.Г. Горбунов, В.И. Иванов, А.А. Козырев и др. – М., 1987. – 116 с.;

64. Предпроектные проработки по оптимизации параметров и режимов развития карьера в проектных контурах в связи с уточнением углов наклона бортов и технических решений по ЦПТ Ковдорского ГОКа (IVчасть): Отчет по х/д №1602-70-95/ АО Гипроруда; Гл. инж. ин-та Н.В. Черевко, гл. инж. Проекта Ю.П. Найко. – СПб, 1996. – 214 с.;

65. Разработка концепции геомеханического и технологического обоснования параметров крутых бортов карьера Ковдорского ГОКа в конечном положении: Отчет о НИР (по I этапу х/д №2685 от 08.07.1998г. с АО «Ковдорский ГОК»); фонды Горного ин-та КНЦ РАН, инв. №989 / Горный институт КНЦ РАН. Науч. руководители: А.А. Козырев, С.П. Решетняк; отв. исполнитель В.В. Рыбин. – Апатиты, 1999. – 44 с.;

66. <http://www.nngasu.ru/geodesy/classification/istoriya/>;

67. Шубин, А.Р. Современные геодезические приборы и системы / А.Р. Шубин, А.И. Ежова, К.Ю. Клепо // Университетская наука. – № 1. – 2016. – С. 17-20;

68. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. – ГКИНП (ГНТА)-03-010-03;

69. Гришко, С.В. Совместное использование результатов спутниковых определений и высокоточного нивелирования в геодинимическом мониторинге / С.В. Гришко, В.Г. Букин // Известия вузов. Горный журнал. – №7. – 2017. – С. 50-56;

70. Ященко, В.Р. Геодезические измерения в регионах интенсивного движения земной коры. / В.Р. Ященко // Геодезия и картография. – №9. – 2015. – С. 48-53;

71. Тихомиров, А.А. Многолетний лазерный дальномерный мониторинг отклонений стенок высоконапорного однокамерного Усть-Каменогорского шлюза. / А.А. Тихомиров, В.В. Татур, В.М. Ляпунов // Гидро-техническое строительство. – № 8. – 2015. – С. 38-44;

72. Антонович, К.М. Использование СРНС в геодезии / К.М. Антонович // Том 1 – 2005;

73. Изотов, А.А. Основы спутниковой геодезии. / А.А. Изотов, В.И. Зубинский, Н.Л. Макаренко, А.М. Микиша. // М.: «Недра». - 1974. – 320 с.;

74. Краснорылов, И. И. Основы космической геодезии. / И.И. Краснорылов, Ю.В. Плахов // М.: «Недра». - 1976. – 216 с.;

75. Макаров, В.И. Изучение современной деформации земной коры методами космической геодезии / В.И. Макаров, А.Ю. Трапезников // Геоэкология. – № 3. – 1996. – С. 70-85;

76. Антонович, К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии / В 2 т., Т.2. Монография / К.М. Антонович // ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. – 360 с.;

77. Будилова, В.В. Комплексный маркшейдерский мониторинг при совместном применении спутниковой и наземной систем наблюдения за деформациями бортов карьеров. Материалы VI Всероссийской молодежной

научно-практической конференции «Проблемы недропользования» 8-10 февраля 2012 / В.В. Будилова, Е.А. Ильинская // Екатеринбург. – С. 446-452;

78. Романько, Е.А. Организация маркшейдерских наблюдений на месторождении Юбилейное ООО «Башкирская медь» / Е.А. Романько, К.Л. Ковырзин // Маркшейдерский вестник. – 2014. – № 4; – С. 22-24;

79. Спирин, В.И. Принципы организации инструментальных наблюдений за деформационными процессами, протекающими в прибортовых массивах карьера «Восточный» Олимпиадинского ГОКа. Материалы VI Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» 8-10 февраля 2012 / В.И. Спирин // Екатеринбург. – С. 529-540;

80. Розанов, И.Ю. Опыт применения GNSS и светодальномерных наблюдений для изучения деформаций массива горных пород в карьере рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» / И.Ю. Розанов, Р.Н. Достовалов, М.А. Кузнецов // ГИАБ. Специальный выпуск 56. – 2015. – С. 183-191;

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

82. Гусев, В.Н. 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.;

83. Опарин, В.Н. Формирование объемной цифровой модели поверхности борта карьера методом лазерного сканирования / В.Н. Опарин, В.А. Середович, В.Ф. Юшкин, А.В. Иванов, С.А. Прокопьева // ФТПРПИ. – 2007. – № 5. – С. 102-112;

84. Рождественский, В.Н. Исследование трещиноватости локальных массивов с помощью средств наземного лазерного сканирования / В.Н.

Рождественский, А.А. Панжин, С.Р. Пьянзин, К.А. Кочнев // Известия вузов. Горный журнал. – № 5. – 2014. – С. 75-79;

85. Лютак, А.И. Технология создания цифровых моделей карьеров с применением лазерных сканеров / А.И. Лютак // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2014. – № 1. – С. 386-388;

86. Дунаев, В.А. Дистанционное определение элементов залегания трещин при натурном изучении деформаций уступов карьеров / В.А. Дунаев, О.В. Олейник, И.М. Игнатенко, Е.Б. Яницкий // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2011. – Вып. 1. - С. 107-111;

87. Ляпишев, К.М. Исследование оползней с применением технологии наземного лазерного сканирования. / К.М. Ляпишев, А.В. Погорелов, Д.Ю. Шуляков // Геодезия, картография и маркшейдерия. - 2014. – С. 26-32;

88. Кольцов, П.В. Методика безотражательных наблюдений за деформирующимися участками бортов карьеров и отвалов / П.В. Кольцов // Записки Горного института. - 2012. – Т. 198. – С 65-69;

89. Желтышева, О.Д. Современные технологии мониторинга устойчивости бортов карьеров / О.Д. Желтышева, Е.Ю. Ефремов // Маркшейдерия и недропользование. – 2014. – № 5. – С 53-66;

90. Заровняев, Б.Н. Мониторинг состояния бортов глубоких карьеров с применением технологии наземного лазерного сканирования / Б.Н. Заровняев, Г.В. Шубин, И.В. Васильев, Л.Д. Варламова // Горный журнал. – № 9. – 2016. – С. 37-39;

91. <https://www.lgroutes.com/Famous/Originator/Huelsmeyer.html>;

92. Исмагилов, Р.И. Использование (опыт тестирования) георадара на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере Михайловского ГОКа / Р.И. Исмагилов, А.Г. Захаров, Б.П. Бадтиев, Н.В.

Сенин, А.А. Павлович, А.С. Свириденко // Горная промышленность. – 2020. – № 3. – С. 84–90. – DOI: 10.30686/1609-9192-2020-3-84-90;

93. <https://www.groundprobe.com/radars/>;

94. <https://hexagon.com/products/product-groups/detection-systems/ground-penetrating-radar>;

95. Dyke, G. P. Best practice and new technology in open pit mining geotechnics: Geita gold mine, Mali—a case study. / G.P. Dyke // World Gold Conference 2009, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2009. – PP. 169–176;

96. Severin, E. Importance of understanding 3-D kinematic controls in the review of displacement monitoring of deep open pits above underground mass mining operations: Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium / Severin E., Eberhardt S., Ngidi A. Stewart // Toronto, May 2009. – PP. 214 – 225;

97. Ramsden, F. Effective use of slope monitoring radar to predict a slope failure at Jwaneng Mine Botswana / F. Ramsden, N. Coli, A.I. Benedetti, A. Falomi, L. Leoni and A. Micheline // Proceedings of the 2015 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 2015. – PP. 162 – 179;

98. Hutchison, B.J. Management of a toppling failure wall collapse at the Kanmantoo Coper Mine in South Australia / B.J. Hutchison, S. Naude, J. Howarth // Proceedings of the 2015 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 2015. – PP. 81 – 98;

99. <https://oko-planet.ru/pogoda/newspogoda/183349-ssha-massivnyy-opolzen-ostanovil-proizvodstvo-v-bingem-kanon.html>;

100. Mitri, H. 2014. Rock Slope Surface Monitoring Technologies with Focus on Ground-Based Synthetic Aperture Radar. Proceedings Mine Planning and Equipment Selection. / H. Mitri and I. Vennes // Switzerland, 2014;

101. Pieraccini, M. 2013. Real Beam vs. Synthetic Aperture Radar for Slope Monitoring. Proceedings Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings. // Stockholm, Sweden. – Aug. 12-15. – 2013;

102. Atzeni, C. 2015. Early Warning monitoring of natural and engineered slopes with Ground Based Synthetic Aperture Radar. / C. Atzeni, M. Barla, F. Pieraccini, A. Antolini // Roc. Mech. Roc. Eng. – vol 48 – Issue 1 – PP. 235-246, Springer;

103. Farina, P. 2011. IBIS-M, Innovative Radar for Monitoring Slopes in Open-Pit Mines. Proceedings, Slope Stability 2011: International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering. / P. Farina, L. Leoni, F. Babboni, F. Coppi, L. Mayer, P. Ricci // Vancouver, Canada (September 18-21, 2011);

104. Farina, P. 2012. Monitoring open pit slopes through Slope Monitoring Radar based on Synthetic Aperture Radar. Proceedings RockEng 2012 21st Canadian Rock Mechanics Symposium. / P. Farina, L. Leoni, F. Babboni, F. Coppi, L. Mayer, N. Coli, A. Helbawi // Edmonton (AB), Canada. – May 5-9, 2012. – PP. 6;

105. Farina, P. 2013. Efficient real time stability monitoring of mine walls: the Çöllolar Mine case study. Proceedings of 23rd International Mining Congress & Exhibition of Turkey / P. Farina, N. Coli, R. Yon, G. Eken, H. Ketizmen // 16-19 April 2013 – Antalya, Turkey;

106. <http://geosystems.ru/shop/Sistemymonitoringastabilnostiustupov/radar-dlya-monitoringa-stabilnosti-ustupov-ibis-fm/>

107. Геомеханика: Учеб. пособие / Э.В. Каспарьян, А.А. Козырев, М.А. Иофис, А.Б. Макаров. – М.: Высш. шк., 2006. – 503 с.;

108. Казикаев, Д.М. Управление геомеханическими процессами при разработке месторождений полезных ископаемых: Учебное пособие / Д.М. Казикаев, А.А. Козырев, Э.В. Каспарьян, М.А. Иофис // М.: Издательство «Горная книга». – 2016. – 490 с.;

109. Rozanov, I.Yu. Specifics in organization of the slope stability monitoring in high-strength hard rock massif of the Kovdor deposit. / I.Yu. Rozanov & A.A.

Zavyalov // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019, Volume 1: Proceedings of the XV International Forum-Contest of Students and Young Researchers under the auspices of UNESCO (St. Petersburg Mining University, Russia, 13-17 May 2019). – P. 476;

110. Завьялов, А.А. Мониторинг бортов и уступов карьера рудника «Железный ОАО «Ковдорский ГОК» в целях долгосрочного прогноза их устойчивости / А.А. Завьялов // Проблемы недропользования. Материалы VI Всероссийской молодежной научно-практической конференции 8-10 февраля 2012. – Екатеринбург. – С. 292-302.

Справка о внедрении результатов диссертационного исследования

**ЕВРОХИМ**

Акционерное общество «Ковдорский горно-обогатительный комбинат»
Россия, 184141, Мурманская область, г. Ковдор, ул. А.И. Сухачева, 5
тел: +7 (81535) 7-60-01, факс: +7 (81535) 7-27-63
eurochemgroup.com, fax_kdr@eurochem.ru

Справка о внедрении
результатов диссертационного исследования

Розанова Ивана Юрьевича

по теме:

«Исследование кинематических параметров обрушений массивов прочных скальных пород (на примере Ковдорского месторождения апатитовых и магнетитовых руд)»

Настоящим подтверждаем, что результаты указанного диссертационного исследования внедрены в инструкции по безопасному ведению горных работ в карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК».

В частности, скорость смещения массива применяется в условиях Ковдорского месторождения как кинематический параметр оценки состояния массива горных пород и прогноза вероятного обрушения

Выявленная скорость 2 мм/ч является критической для реализации обрушения и используется при прогнозе вероятных обрушений, а также внедрена в систему оповещения радарного мониторинга устойчивости уступов и борта карьера «Железный».

В рамках хоз.договора № 2693 от 1.06.2023 между АО «Ковдорский ГОК» и ГоИ КНЦ РАН была составлена временная инструкция по наблюдению за деформациями бортов и откосов уступов карьера с помощью радара IBIS FM, в которой указаны положения по организации работы радара IBIS FM, а также прописан порядок действий оператора при подаче сигнала тревоги.

В рамках хоз.договора № 2650 от 08.05.2020 между АО «Ковдорский ГОК» и ГоИ КНЦ РАН была составлена инструкция по выявлению неустойчивых участков борта карьера с помощью наземных радаров, которая стала дополнением к предыдущей инструкции. В ней указывается порядок действий для выявления опасных участков борта карьера и порядок действий при возникновении угрозы обрушения пород.

Главный инженер
АО «Ковдорский ГОК»

