

*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.

Автореферат

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Апатиты — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки  
Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии  
наук»

#### Научные руководители

**Каспарьян Эдуард Варужанович**, доктор технических наук  
**Рыбин Вадим Вячеславович**, доктор технических наук

#### Официальные оппоненты

**Батугин Андриан Сергеевич**, доктор технических наук  
профессор кафедры безопасности и экологии горного производства  
Национального исследовательского технологического университета  
«МИСиС»

**Панжин Андрей Алексеевич**, кандидат технических наук  
ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения  
науки Института горного дела Уральского отделения Российской академии  
наук.

#### Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский  
федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской  
академии наук, г. Пермь.

Защита диссертации состоится 28 ноября 2023 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании  
диссертационного совета 24.1.478.01, созданного на базе Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра  
Дальневосточного отделения Российской академии наук, по адресу: 680000, г. Хабаровск,  
ул. Тургенева, д. 51, конференц-зал. Тел./факс: +7(4212)32-79-27, e-mail: adm@igd.khv.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального  
исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук по  
адресу 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51 и на сайте [www.khfrs.ru](http://www.khfrs.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук



С.И. Корнеева

## Общая характеристика работы

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 получить 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 ее 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, Ковдорского месторождения.

**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 бора 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.

**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 относиться 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» (Хабаровск, 2020), всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов «Цифровые технологии в горном деле» (Апатиты, 2021), XXX Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2022» (Москва, 2022); IV международной научно-практической конференции «Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ (Магнитогорск, 2022); XXXI Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2023» (Москва, 2023), 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.

## Основное содержание работы

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.

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).

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

- к первой группе можно отнести способ выявления эмпирических закономерностей, полученные 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;

- к методикам третьей группы можно отнести 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».

В настоящей работе применена методика первой группы – выявление эмпирических закономерностей, полученных при анализе результатов наблюдений за разрушениями реальных горнотехнических объектов. Несмотря на трудоемкость данного метода, на сегодняшний день он 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.

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 и самой удачной и эффективной технологической новинкой стало внедрение в практику мониторинга устойчивости бортов карьеров радарных технологий.

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 1). Величина смещения прямо пропорциональна величине разности фаз.

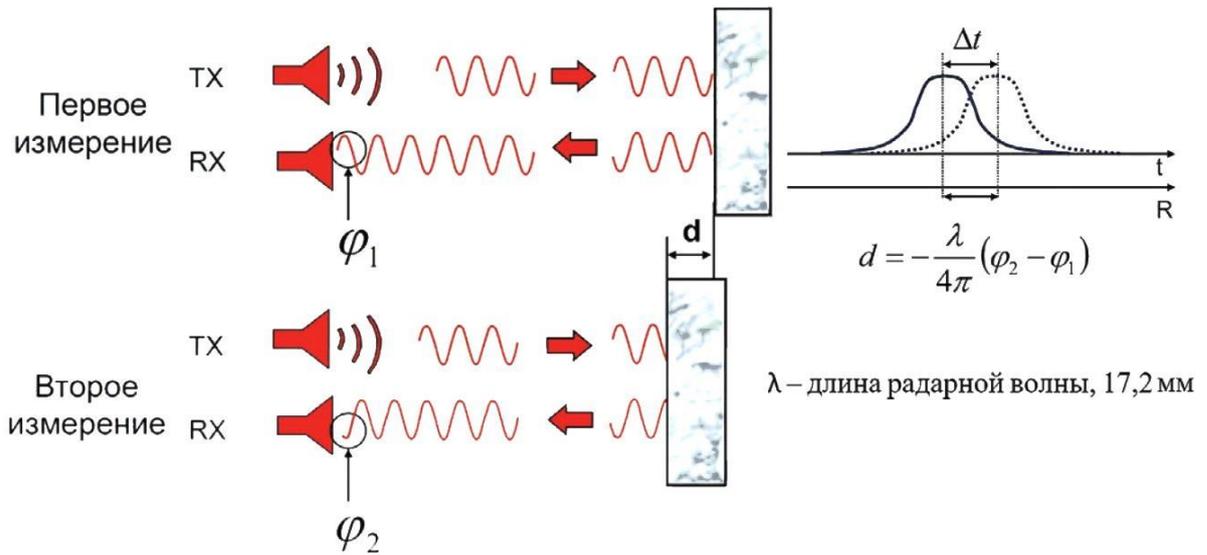


Рисунок 1 – Принцип работы радарной системы

На рисунке 1  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  - величины фаз до смещения и после смещения соответственно,  $d$  – зафиксированное смещение. Путем сопоставления фаз определяется величина смещения.

Для установления закономерностей развития процесса разрушения и определения критических значений кинематических параметров обрушений массивов прочных скальных пород были собраны и проанализированы данные о случаях обрушений в карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК» за период с 2014 по 2023 год. 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 1 приведены данные проанализированных обрушений.

Таблица 1 - Сводная таблица данных о проанализированных случаях потери устойчивости в карьере «Железный»

№	Дата	Участок	Документ о фиксации события	Объем обрушения, м <sup>3</sup>
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
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 5000 м<sup>3</sup>), 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 м<sup>3</sup>) 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 30.05.2023г. Для удобства дальнейшего анализа и описания каждому случаю присвоен порядковый номер.

Основные результаты диссертационных исследований отражены в научных положениях, выносимых 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.**

Первой задачей анализа кинематических показателей процесса обрушения является установление параметра, по которому следует осуществлять дальнейший прогноз состояния массива. Последовательно были проанализированы графики параметров смещения, скорости смещения и ускорения скорости смещения массива горных пород Ковдорского месторождения.

Чтобы оценить возможность применения параметра «смещение» в качестве критерия оценки состояния массива в условиях высокопрочных горных пород на рисунке 2 приведен пример графика смещений случая потери устойчивости (№1 в таблице 1) участка борта в карьере «Железный» с указанием момента обрушения.



Рисунок 2 – Пример графика смещения при обрушении участка борта в карьере «Железный» с указанием момента обрушения

Для выбранных случаев обрушения участков массива горных пород были определены предельные значения смещений и помещены в таблицу 2. В данном случае под предельными значениями смещений понимается максимальное накопленное смещение участка борта, после которого произошел фактический отрыв породы от массива.

Таблица 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

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 данных таблицы 2 следует, что предельные значения смещений существенно отличаются друг от друга. Минимальное значение составляет 5 мм, а максимальное 880 мм. Кроме того, из представленных графиков можно сделать вывод, что трудно спрогнозировать состояние массива поскольку затруднительно установить 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. Следовательно, это параметр не подходит для оценки состояния массива в данных горно-геологических условиях.

Чтобы проанализировать возможность применения в качестве критерия оценки состояния массива в условиях высокопрочных горных пород параметра «скорость смещение» на рисунке 3 приведен пример графика скорости смещений случая потери

устойчивости (№1 в таблице 1) участка борта в карьере «Железный» с указанием момента обрушения. Кроме того, в таблицу 3 занесены предельные скорости смещения массива, т.е. зафиксированные непосредственно перед отрывом горной массы от массива, для всех обрушений.

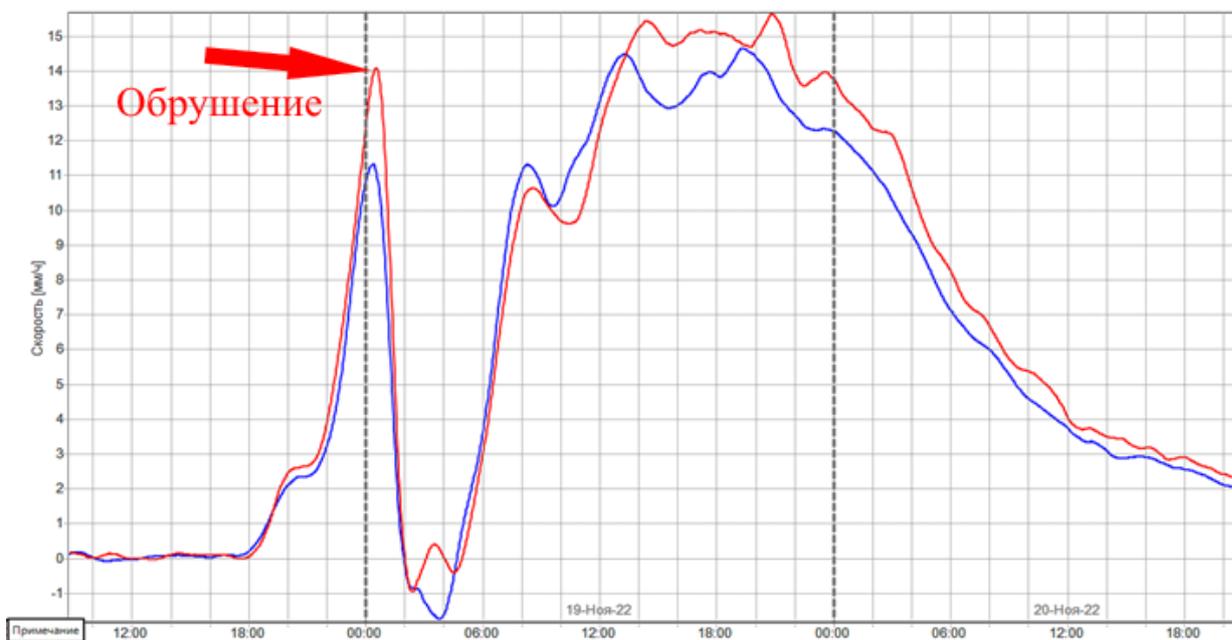


Рисунок 3 – Пример графика скорости смещения при обрушении участка борта в карьере «Железный» с указанием момента обрушения

Таблица 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 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

Анализируя данные таблицы 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.

Однако из показанного примера графика скорости на рисунке 3 видно, что обрушение происходило при ярко выраженном максимальном значении скорости смещения массива, и кроме того, сам график характеризуется плавным нарастанием и падением скорости смещения, а значит, используя данный параметр можно спрогнозировать возможное обрушение.

Основным недостатком кинематического параметра ускорение скорости смещения является слишком резкое возрастание и падение графиков в отличие от графиков скорости, где возрастание происходит плавно. На рисунке 4 показан пример графика этого кинематического параметра.

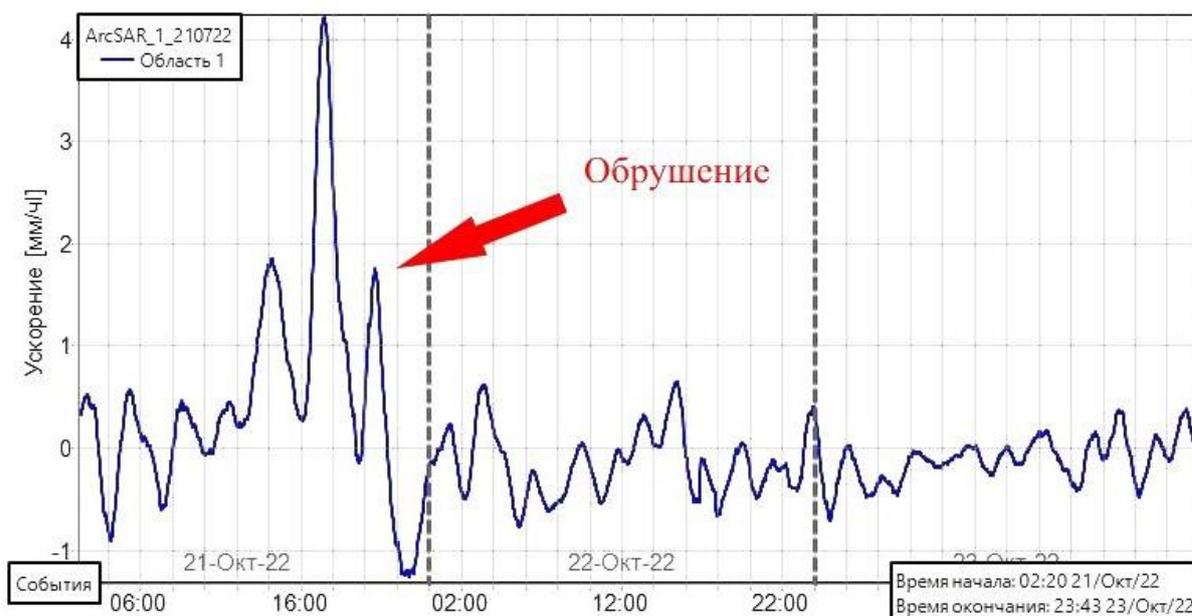


Рисунок 4 – Пример графика ускорения скорости смещения при обрушении №10 в таблице 2.1

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. Это значительно затрудняет анализ данных и прогноз состояния массива. К тому же, исходя из графика на рисунке 4, момент обрушения не характеризуется максимальным значением ускорения, как в случае с графиками скорости.

Таким образом установлено, что кинематический параметр «скорость смещения» является наиболее подходящим для оценки состояния массива горных пород и прогноза вероятного обрушения.

**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.**

В пределах карьера «Железный» наблюдаются следующие виды обрушений: вывалы и осыпи трещиноватых и дезинтегрированных пород, оползни-обрушения, клиновидные (призматические) обрушения, плоскостные обрушения. Кроме того, встречаются различного рода комбинированные обрушения, а также деформация типа «Консоль». Все это говорит о большом разнообразии механизмов, по которым могут происходить обрушения.

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. Пример графика скорости смещения, который типичен для данной группы представлен на рисунке 5.

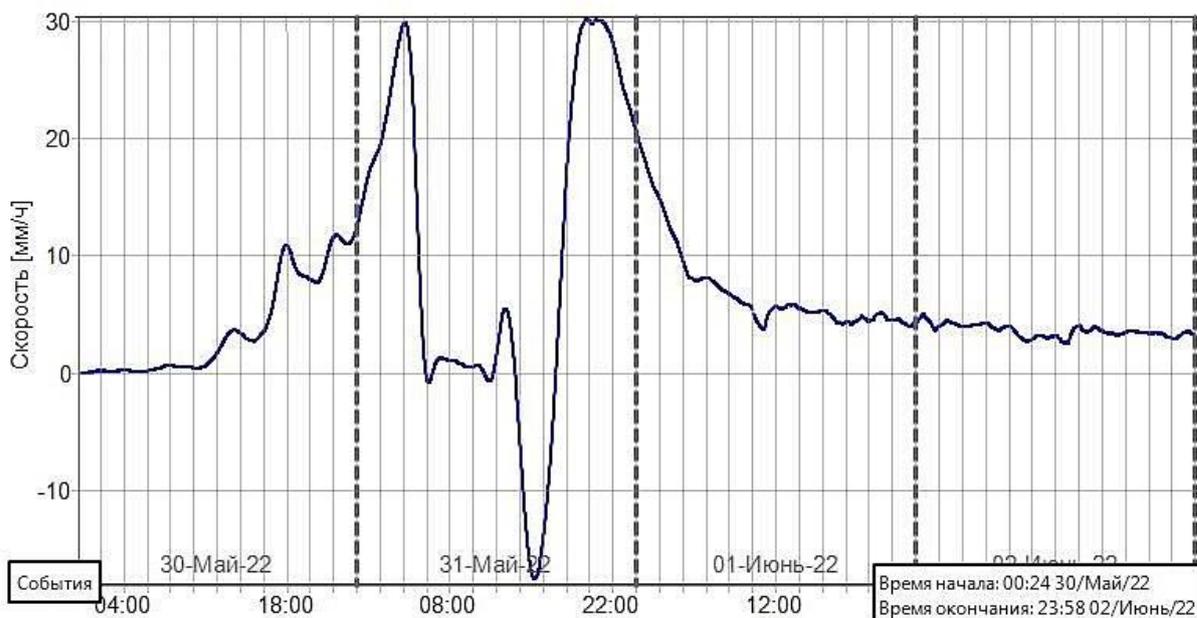


Рисунок 5 – Типичный график скорости смещения массива горных пород при оползне-обрушении (обрушение №3)

Обрушения произошли на верхних горизонтах карьера в массивах слабых и дезинтегрированных пород. Характерными особенностями данной группы 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 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, 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 до формирования естественного угла откоса.

Остальные типы обрушений, зафиксированные в карьере «Железный», 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 0,5-3,0 м<sup>3</sup>. Типичный график скорости смещения массива при обрушениях в сильнотрещиноватом (дезинтегрированном) массиве представлен на рисунке 6.

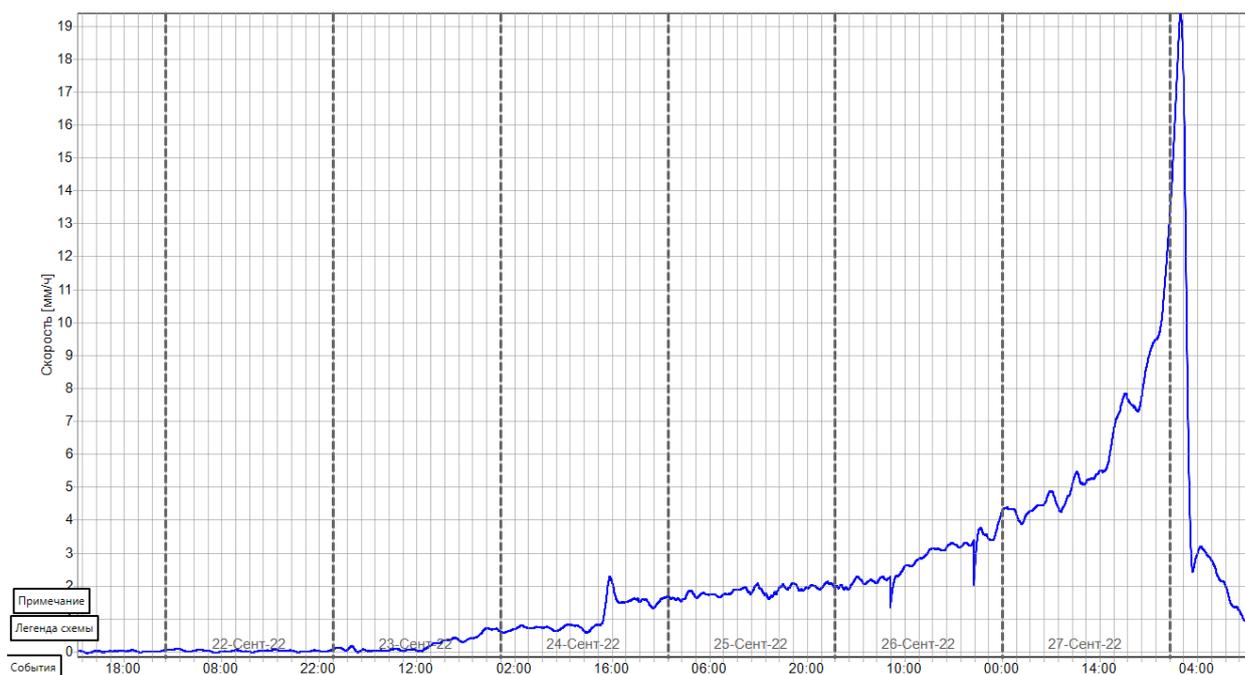


Рисунок 6 – Типичный график скорости смещения массива при обрушениях в сильнотрещиноватом (дезинтегрированном) скальном массиве (обрушение №5)

Выделено 10 обрушений 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 массива также являются и достаточно хрупкими, вследствие чего, при формировании подобного обрушения, процесс отрыва породы от массива наступает достаточно быстро. На рисунке 7 представлен типичный график скорости смещения массива горных пород при данном виде обрушений.

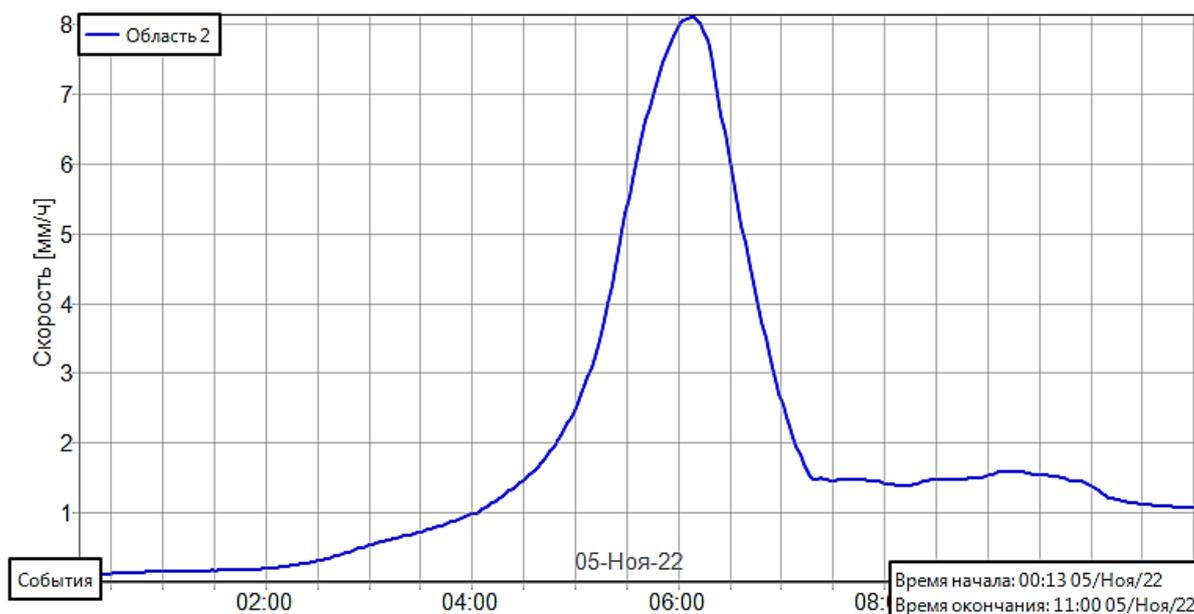


Рисунок 7 - Типичный график скорости смещения горных пород при обрушении скального массива (обрушение №9)

Выделено 6 обрушений данного вида из 22 проанализированных. В отличие от дезинтегрированных скальных массивов скорость смещения в данном случае увеличивается достаточно быстро, 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).

**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.**

Одной из основных задач исследования являлось установление критических значений кинематического параметра «скорость смещения». Под критическим значением скорости смещения подразумевается скорость при превышении которой обрушение неизбежно произойдет.

Задача по определению критической скорости смещения была разделена на 3 временных отрезка.

На первом временном отрезке с 2014 по конец 2015 года было зафиксировано два обрушения. Первое произошло 01.10.2014 (№21) имело объем не более 500 м<sup>3</sup> и особой информативностью не обладало поскольку значения скорости смещения массива были достаточно минимальны. Второе произошло 24 августа 2015 года на восточном участке борта (гор. +70 м; -35 м) имело объем 180 000 м<sup>3</sup>. По величинам перемещений рассчитывалось значение скоростей, и был построен соответствующий график, который показан на рисунке 8.

График изменения скорости

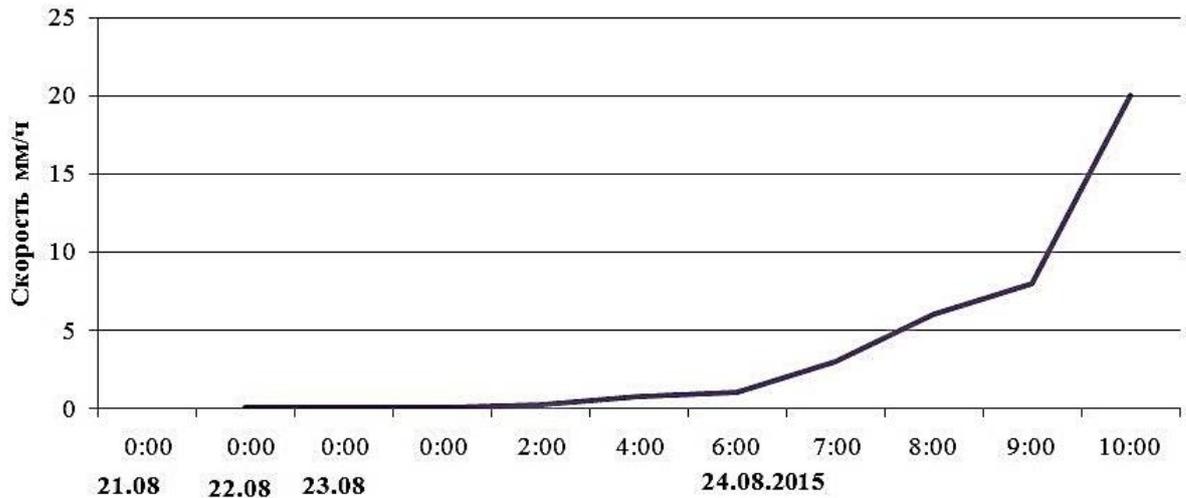


Рисунок 8 - График изменений скорости смещений во времени (обрушение № 7 от 24 августа 2015)

Из данных, приведенных на рисунке 8, 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.

Второй временной период начинается с октября 2018 по октябрь 2020. За данный период произошло 5 обрушений и из проанализированных данных стало очевидно, что процесс разрушения разделен на этапы, которые характеризуются своими скоростями.

Например, 8 октября 2018 г. произошло обрушение в массиве скальных пород. На рисунке 9 показан график скорости смещения массива обрушения №20 (от 08.10.2018) с этапами разрушения.

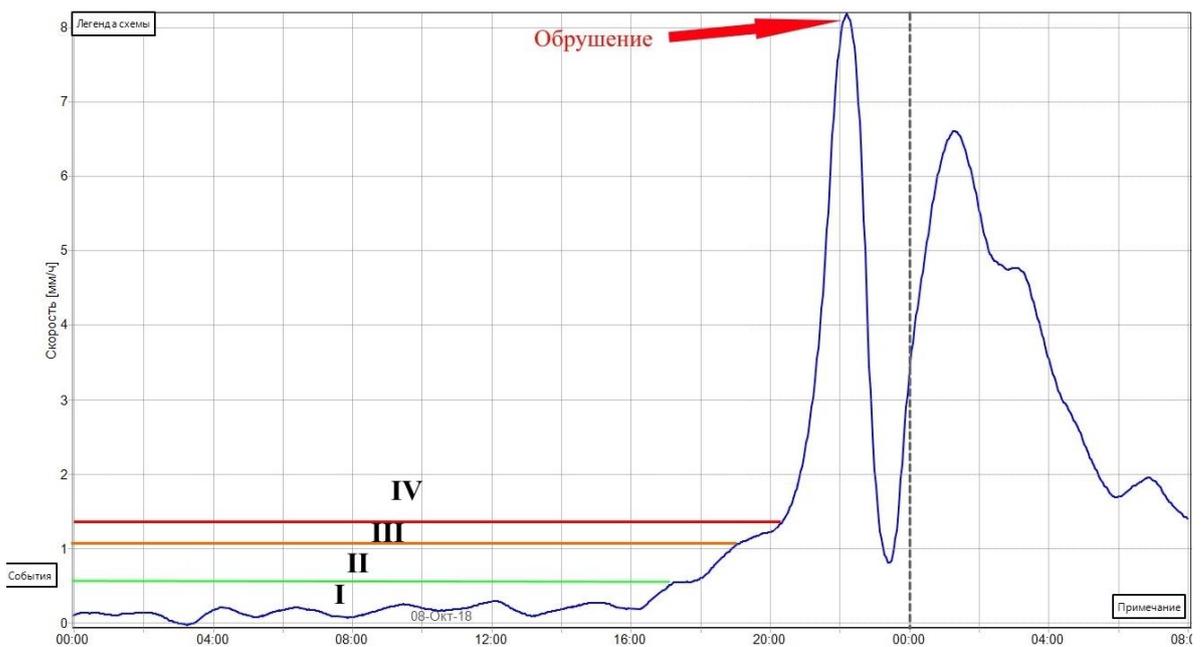


Рисунок 9 – График скорости смещения массива обрушения №20 (от 08.10.2018) с этапами разрушения

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.

16 октября 2018 года произошло еще одно. На рисунке 10 показан график скорости смещения массива обрушения №19 (от 16.10.2018) с этапами разрушения.

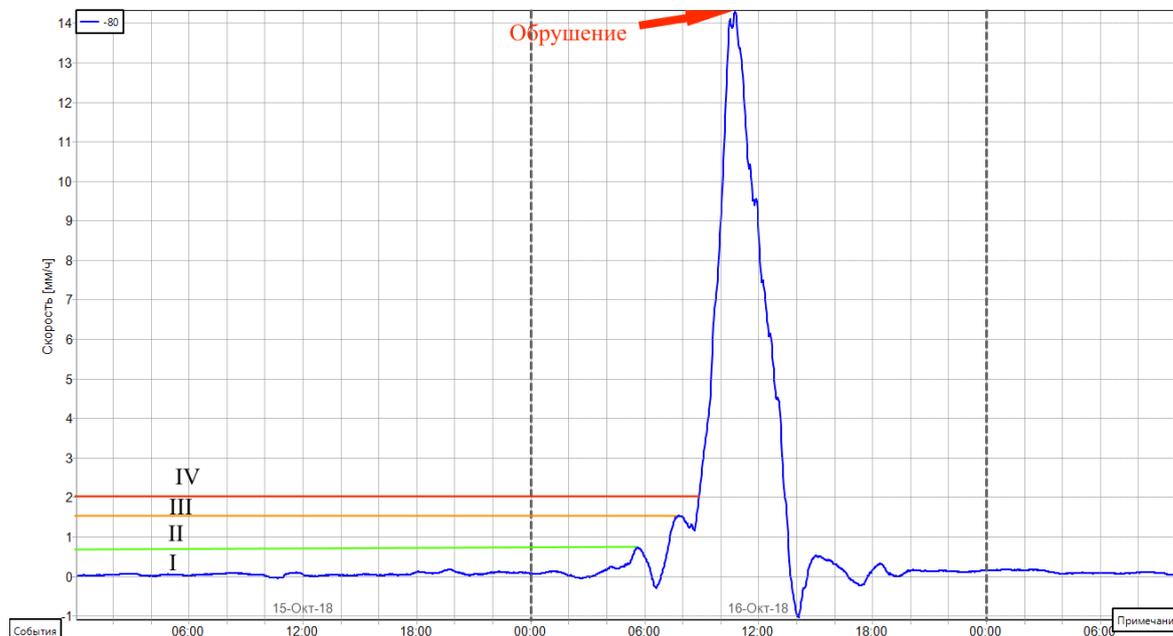


Рисунок 10 - График скорости смещения массива обрушения №19 (от 16.10.2018) с этапами разрушения

На графике на рисунке 10 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.

Учитывая данные о случаях потери устойчивости на втором временном отрезке было установлено, что значение критической скорости 3 мм/ч является достоверным, однако учитывая выявленный характер процесса целесообразнее использовать 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 временном отрезке с декабря 2020 года по май 2023 года выполнялась проверка достоверности установленной критической скорости. За этот период задокументировано еще 15 обрушений, 14 из которых удачно спрогнозированы. В качестве примера удачного прогноза можно привести обрушение от 30 апреля 2021 года объемом около 30 000 м<sup>3</sup>, которое произошло на южном участке борта карьера. Участок борта сложен фенитами по всей части обрушения. Фениты темно-серые, зеленовато-серые, мелко-среднезернистые, трещиноватые, ослуденелые. На рисунке 11 показана карта скорости с выделенной областью обрушения, а на рисунке 12 график скорости смещения данной области. Тип оползень – обрушения.

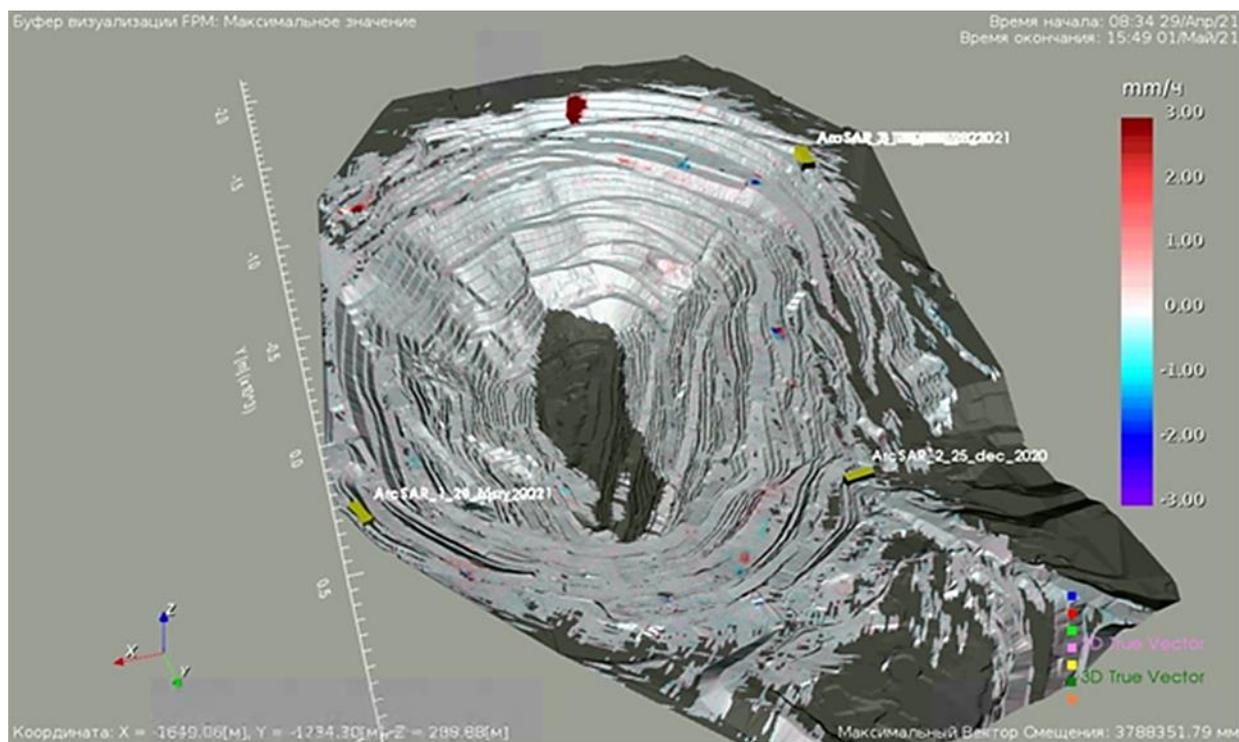


Рисунок 11 – Область обрушения на южном участке борта гор. +322 – +262 м

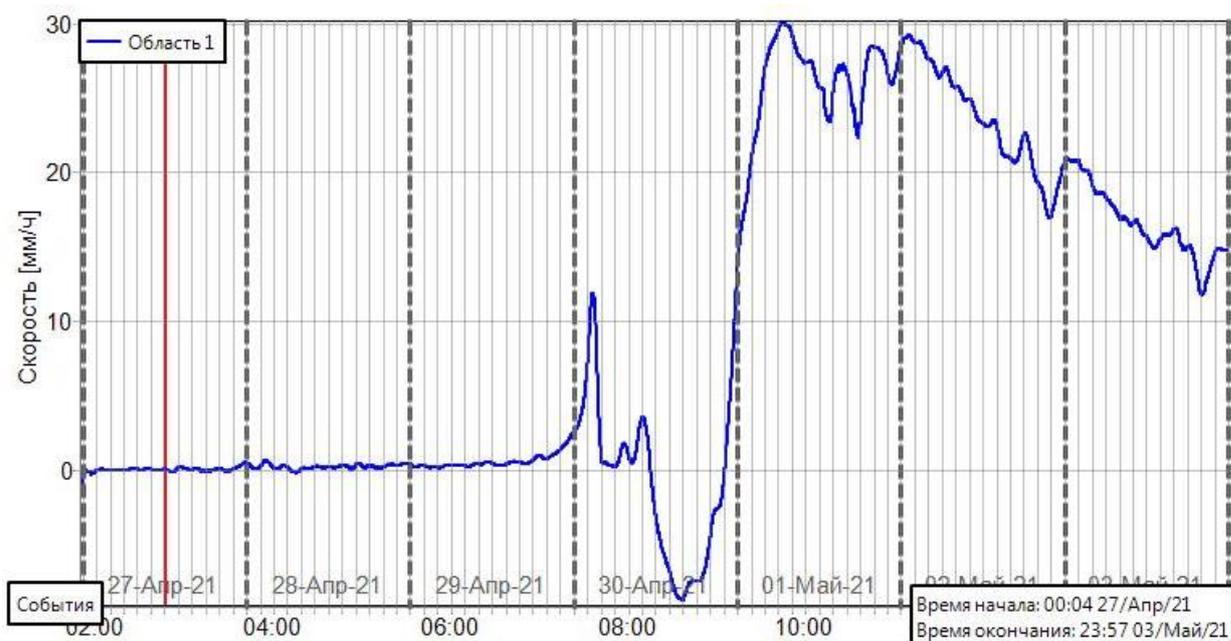


Рисунок 12 - График скорости смещения области на южном участке борта гор. +322 – +262 м.

Основной этап обрушения произошел 30 апреля в 03.00. Для более детального обзора на рисунке 13 показан график скорости смещения данного обрушения за период 29 апреля - 30 апреля с указанным критическим значением скорости.



Рисунок 13 - График скорости смещения обрушения №4 за период 29 апреля - 30 апреля с указанным критическим значением скорости

Активное смещение участка борта началось приблизительно 29 апреля в 10 часов, 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 03:00 30 апреля, т.е. через 4 часа после превышения предельного значения скорости смещения. Необходимо отметить сотрудников геомеханической службы, которые действовали строго по составленной инструкции и вовремя закрыли участок, так как непосредственно под обрушением находилась транспортная берма. На рисунке 14 результат реализованного обрушения.



Рисунок 14 – Обрушение №4 в карьере «Железный» от 30 апреля 2021 года

В результате проверки достоверности критической скорости смещения массива горных пород установлено, что 21 рассмотренный случаи 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 он относится.

## Заключение

На сегодняшний день глубина многих крупных карьеров в России и мире уже превышает 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 выявление 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 год. 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 результате выполненного анализа данных получены следующие научные выводы и практические результаты:

1 Скорость смещения, как кинематический параметр, является наиболее информативной 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 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 выделены все зафиксированные оползни-обрушения. Особенностями 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 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 годы 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 года по май 2023 года. 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».

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:  
В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1 Каспарьян Э. В., Кожуховский А. В., Розанов И. Ю. Опыт организации мониторинга устойчивости бортов и уступов карьера // Известия вузов. Горный журнал, №5. 2015. С. 67-74;

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

3 Розанов И. Ю., Кузнецов М. А., Достовалов Р. Н. Опыт применения методов космической геодезии для геомеханического мониторинга массивов горных пород при открытых горных работах // ГИАБ, №4. 2017. С. 100-106;

4 Розанов И. Ю., Завьялов А. А. Применение радара IBIS FM для контроля состояния борта карьера рудника «Железный» (АО «Ковдорский ГОК») // ГИАБ, №7. 2018. С. 40-46;

5 Рыбин В. В., Константинов К. Н., Розанов И. Ю. Многоуровневый подход к организации мониторинга устойчивости бортов карьеров // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 5. С. 106-113. DOI: 10.15372/FTPRI20210510;

6 Розанов И. Ю., Ковалев Д. А. Результаты анализа данных радарной системы мониторинга устойчивости борта карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 12-1. С. 122–133. DOI:10.25018/0236\_1493\_2022\_121\_0\_122;

7 Розанов И. Ю., Рыбин В. В., Константинов К. Н. Реализация многоуровневого комплексного мониторинга устойчивости бортов карьеров // Горная промышленность. 2023; (S1):00–00. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-00-0>.

**В прочих изданиях:**

8 Розанов И. Ю., Коржанков Р. Б. Опыт применения наземной лазерной-сканирующей съемки в карьере рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» // Материалы VII Конференция-школа молодых ученых «Геотехнология и обогащение полезных ископаемых», Апатиты, 18-20 ноября 2015 г. С. 43-46;

9 Розанов И. Ю., Завьялов А. А., Кожуховский А. В., Коржанков Р. Б. Методы и средства локального мониторинга устойчивости бортов в карьере рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» // IX международная школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» и VI Российско-Китайский научно-технический форум «Проблемы нелинейной геомеханики на больших глубинах». Тезисы докладов, Апатиты, 13-17 июня 2016 г.;

10 Fedotova Iuliia, Kasparian Eduard, Rozanov Ivan, Kusnetsov Mikhail, Dostovalov Roman, Strain monitoring of hard rock mine slopes // INTERNATIONAL EUROPEAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM, EUROCK 2018. Saint Petersburg, 22-26 мая 2018 г. Geomechanics and geodynamics of rock masses set of 2 volumes. 2018. P. 1451-1456;

11 I.Yu. Rozanov Specificity of the slope stability monitoring organization under the conditions of high-strength hard rock massif of the Kovdor deposit // Topical issues of rational use of natural resources: Scientific Conference Abstracts. Saint-Petersburg Mining University. St. Petersburg, 2019. P. 348;

12 I.Yu. Rozanov & A.A. Zavyalov Specifics in organization of the slope stability monitoring in high-strength hard rock massif of the Kovdor deposit // 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. <https://doi.org/10.1201/9781003014577>;

13 Розанов И. Ю., Завьялов А. А. Определение предельных параметров деформирования и разрушения массива горных пород карьера «Железный» (АО «Ковдорский ГОК») по данным наземного радара IBIS FM // Триггерные эффекты в геосистемах: Тезисы докладов V-й Международной конференции, Москва, 4–7 июня 2019 г. М.: ГЕОС. 2019. С. 217;

14 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. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_41);

15 Anatolii Kozyrev, Eduard Kasparian and Ivan Rozanov The integrated geodetic monitoring system of open pit slopes in hard rock massifs // VIII International Scientific Conference «Problems of Complex Development of Georesources» (PCDG 2020) Khabarovsk, Russian Federation, September 8-10, 2020. I. Rasskazov and S. Tkach (Eds.) E3S Web of Conferences Volume 192 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019201015>;