

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ХАБАРОВСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

На правах рукописи

Сидляр Александр Владимирович

**РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ МЕР
БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОТРАБОТКЕ НИКОЛАЕВСКОГО
ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СЛОЖНОЙ
ТЕКТОНИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ**

Специальность 25.00.20 – “Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика”

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
Рассказов Игорь Юрьевич,
член-корреспондент РАН
доктор технических наук

Хабаровск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Современные представления о проблеме динамических проявлений горного давления при отработке удароопасных месторождений полезных ископаемых.....	10
1.1 Ретроспективный анализ проблемы удароопасности в мире и на рудниках Дальнего Востока России.....	10
1.2 Анализ существующих представлений о механизме и причинах формирования удароопасных ситуаций на рудных месторождениях.....	17
1.3 Обзор методов и технических средств изучения геомеханического состояния массива горных пород.....	23
1.4 Принципы управления горным давлением при отработке удароопасных месторождений сложной тектонической структуры.....	28
1.5 Цель и задачи диссертационной работы.....	32
Выводы по главе 1.....	33
2 Исследование влияния природных и техногенных факторов на геомеханическое состояние массива Николаевского месторождения.....	35
2.1 Структурно-геологические и горнотехнические условия разработки Николаевского месторождения.....	35
2.2 Изучение геомеханического состояния массива горных пород на глубоких горизонтах рудника по данным сейсмоакустического мониторинга.....	43
2.3 Оценка влияния структурно-геологических особенностей на напряженно-деформированное состояние массива горных пород.....	58
2.4 Статистический анализ данных сейсмоакустического контроля и взаимосвязь ключевых факторов, определяющих удароопасность месторождения.....	64
Выводы по главе 1.....	72
3 Исследование закономерностей формирования поля напряжений на глубоких горизонтах Николаевского месторождения.....	74

3.1	Методика математического моделирования напряженно-деформированного состояния структурно-неоднородного массива горных пород.....	74
3.2	Особенности формирования полей напряжений при отработке очистных блоков рудных залежей «Восток-1» и «Харьковская».....	80
3.3	Оценка влияния структурно-геологических особенностей на напряженно-деформированное состояние разрабатываемого массива горных пород.....	90
3.4	Определение напряженного состояния конструктивных элементов систем разработки на глубоких горизонтах месторождения.....	97
	Выводы по главе 3.....	104
4	Обоснование технических и технологических решений по предотвращению горных ударов и снижению геодинамического риска в условиях Николаевского месторождения.....	106
4.1	Параметры региональных мер безопасности при ведении горных работ в условиях влияния геодинамически активных разломов.....	106
4.2	Обоснование эффективных профилактических мероприятий локального характера для отработки глубоких горизонтов Николаевского месторождения.....	116
4.3	Выбор рекомендуемых мер безопасности. Типизация очистных блоков по степени их удароопасности.....	133
	Выводы по главе 4.....	136
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	139
	СПИСОК ИСТОЧНИКОВ.....	141

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В последние годы разработка многих рудных месторождений России и мира сопровождается не только увеличением глубины отработки и объема выработанных пространств, но и вызванной этим ухудшением геодинамической обстановки, что неизбежно приводит к возникновению опасных динамических проявлений горного давления в виде толчков, горных ударов и техногенной сейсмичности. Вследствие этого повышается риск аварий и несчастных случаев при ведении горных работ, снижается эффективность разработки полезных ископаемых.

Сложная геомеханическая ситуация складывается на расположенном в Восточном Приморье России Николаевском полиметаллическом месторождении, на котором горные работы достигли глубины 800–850 м, а суммарный объем выработанного пространства превысил 4 млн. м³. Развитие деформационных процессов в результате обширной подработки массива горных пород, сопровождаемого его структурной перестройкой, привело к значительному росту числа и интенсивности динамических проявлений горного давления и появлению техногенной сейсмичности. Это требует совершенствования имеющейся в настоящее время научно-методической базы, на которой строится текущий и среднесрочный прогноз удароопасности и обосновываются состав и параметры противоударных мероприятий. В частности, при обосновании комплекса эффективных мер по управлению горным давлением требуется более полный учет особенностей тектонической структуры и закономерностей геодинамических процессов в массиве нижней части месторождения. Для этого необходимо применение комплексного подхода, базирующегося на применении как численных, так и инструментальных методов, позволяющих заблаговременно выявить в массиве потенциально удароопасные участки и обеспечить их эффективную «контролируемую» разгрузку.

Многофакторность причин удароопасности Николаевского месторождения требует изучения закономерностей распределения полей напряжений на основании расчетов объемных моделей напряженно-деформированного состояния (НДС), в полной мере также учитывающих тектоническую структуру массива. При этом

использовать метод прогнозного моделирования необходимо в комплексе с непрерывным сейсмоакустическим мониторингом реальных геомеханических процессов, протекающих в горном массиве. Применение взаимодополняемых методов позволяет создавать более адекватные математические модели, верифицировать результаты расчётов, а также даёт возможность разработать и обосновать эффективные противоударные мероприятия и технологические решения, которые позволят в дальнейшем безопасно отрабатывать глубокие горизонты Николаевского месторождения. В связи с этим исследования, направленные на разработку геомеханических мер для обеспечения безопасности ведения горных работ на Николаевском месторождении, являются актуальной научной задачей.

Основу диссертационной работы составляют результаты исследований, полученные при непосредственном участии автора в 2010–2020 гг. в процессе выполнения планов научно-исследовательских работ Института горного дела ДВО РАН «Создание теоретических и методических основ прогнозирования геомеханических процессов для предупреждения горных ударов (техногенных катастроф) при подземном освоении месторождений твердых полезных ископаемых» (№ ГР 01201253447), «Развитие научно-методических основ и технических средств оценки и мониторинга опасных геомеханических процессов для снижения риска техногенных катастроф при освоении месторождений полезных ископаемых Дальневосточного региона (№ 0293-2015-0004), «Развитие научно-методических основ и технических средств оценки и мониторинга опасных геомеханических процессов для снижения риска техногенных катастроф при освоении месторождений полезных ископаемых дальневосточного региона» (№ АААА-А18-118020590021-9), гранту РФФИ 09-05-00533-а «Выявление закономерностей и обоснование моделей формирования очагов горных и горно-тектонических ударов в природно-техногенных геодинамических системах», проекту ФЦП «Дальний Восток» № 15-И-2-057 «Разработка системы комплексного геомеханического мониторинга для предупреждения опасных геодинамических явлений при освоении месторождений в сложных горно-геологических и удароопасных условиях».

Цель диссертационной работы заключается в разработке и геомеханическом обосновании комплекса профилактических мер для безопасного ведения горных работ на глубоких горизонтах сложноструктурного полиметаллического Николаевского месторождения, опасного по горным ударам.

Идея диссертации состоит в использовании установленных закономерностей формирования высоконапряженных зон в сложноструктурном массиве горных пород Николаевского месторождения для разработки и обоснования комплекса технических и организационных мероприятий по предотвращению горных ударов и снижению геодинамического риска.

Для реализации идеи и достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

- изучить геомеханические, структурно-геологические и горнотехнические условия отработки глубоких горизонтов удароопасного Николаевского месторождения;
- установить закономерности изменения акустической активности в сложноструктурном массиве горных пород в их взаимосвязи с крупными динамическими явлениями и техногенной сейсмичностью;
- методом математического моделирования установить закономерности геомеханических процессов и оценить характер и степень влияния тектонической структуры на напряженно-деформированное состояние массива горных пород на различных стадиях отработки глубоких горизонтов месторождения;
- обосновать комплекс эффективных профилактических мероприятий и технологических решений для повышения безопасности горных работ и снижения риска геодинамических явлений.

Методы исследований. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе использован комплекс методов, включающий в себя: экспериментальные шахтные инструментальные измерения и визуальные наблюдения за проявлениями удароопасности и сейсмоакустической активности; математическое моделирование напряженно-деформированного состояния горного массива методом конечных элементов; статистический анализ и сопоставление данных сейсмоакустического мониторинга с результатами

численного моделирования НДС и структурно-геологическими и горнотехническими особенностями Николаевского месторождения.

Научные положения, выносимые автором на защиту:

1. Механизм проявления удароопасности и техногенной сейсмичности Николаевского месторождения при отработке его нижней части (ниже гор. – 320 м) в значительной части (91 % случаев) формируется вследствие развития геодинамических процессов при отработке очистных блоков в районе активного разлома ТН-3 и восточной границы олистолита известняков, являющихся главными элементами техногенно трансформируемой природно-технической системы.

2. Высокая концентрация напряжений (до 140 МПа) в разрабатываемом массиве нижней части Николаевского месторождения определяется морфологией контура олистолита известняков и положением очистных блоков относительно геодинамически активного разлома ТН-3, поэтому наиболее удароопасными конструктивными элементами камерной системы разработки с управляемым обрушением кровли являются междуканальные целики в приразломной зоне на участках крутого поднятия поверхности тела олистолита.

3. Условия геомеханической безопасности горных работ на глубоких горизонтах Николаевского месторождения обеспечиваются путём целенаправленного управления геомеханическими процессами в высоконапряженном сложноструктурном массиве горных пород (в пределах акустически активных зон) с применением комплекса разработанных противоударных мероприятий регионального и локального уровня, в частности, – за счёт расположения очистных камер под углом более 57-71° к разлому ТН-3 (в зависимости от типа пород).

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и практических рекомендаций обеспечивается корректным выбором методов и подходов для проведения комплексных исследований, представительным объемом экспериментальных и расчетных данных, полученных по результатам сейсмоакустического мониторинга и математического моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород, а также высокой сходимостью результатов теоретических исследований с данными шахтных

экспериментов и визуальных наблюдений.

Научная новизна выполненных исследований заключается в следующем:

- выявлены закономерности проявлений акустической активности в разрабатываемом массиве горных пород сложной геолого-тектонической структуры и установлено определяющее влияние тектонически активного разлома ТН-3 и кровли олистолита известняков при формировании удароопасности в процессе отработки нижней части Николаевского месторождения;

- установлены закономерности формирования природно-техногенных полей напряжений в конструктивных элементах камерной системы разработки с управляемым обрушением кровли в условиях высокой структурной неоднородности;

- установлена количественная зависимость, связывающая глубину заложения выработок, их ориентацию относительно главных напряжений и параметры бурения разгрузочных скважин;

- научно обоснован комплекс мер безопасности и рекомендаций по управлению горным давлением при отработке нижней части Николаевского месторождения, включая «управляемую» разгрузку высоконапряженных, акустически активных зон.

Личный вклад автора включает в себя:

- постановку задач, обоснование начальных и граничных условий решений, разработку плоских и объемных конечно-элементных моделей, выполнение и анализ результатов расчетов напряженно-деформированного состояния массива;

- создание планов изогипс контуров основных геологических пород и их интеграция в 3D-модель в совокупности с тектонической структурой и элементами очистного пространства;

- обработку и обобщение полученных результатов сейсмоакустического мониторинга, сопоставление их с объемной моделью месторождения, установление закономерностей формирования удароопасных ситуаций;

- статистический анализ и установление основных причин и факторов динамических проявлений удароопасности и техногенной сейсмичности на нижних горизонтах Николаевского месторождения;

- установление закономерностей формирования природно-техногенных полей напряжений в конструктивных элементах систем разработки и в условиях ведения горных работ вдоль тектонически активных крутопадающих разломов;
- разработку типизации очистных блоков и обоснование комплекса мер безопасности и рекомендаций по управлению горным давлением для отработки глубоких горизонтов сложноструктурного Николаевского месторождения.

Практическая ценность проведенных исследований заключается в использовании полученных результатов для разработки мер безопасности и обоснования геомеханических решений при планировании и производстве горных работ на глубоких горизонтах Николаевского месторождения, что существенно снижает риск опасных динамических явлений.

Реализация работы. Результаты исследований использованы при разработке «Указаний по безопасному ведению горных работ на месторождениях Николаевское и Южное (АО «ГМК «Дальполиметалл»», опасных по горным ударам», 2018 г. и учитываются при проектировании и ведении горных работ на удароопасных участках месторождений.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы представлялись на научных конференциях: XVIII, XIX и XXII краевых конкурсах молодых ученых (г. Хабаровск, 2016, 2017 и 2020 гг.); VI-VIII международной научной конференции «Проблемы комплексного освоения георесурсов» (г. Хабаровск, 2016, 2018, 2020 гг.); XI всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (Екатеринбург, 2017 г.); XXV международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2017 г.); 1-ой Международной научной конференции «Проблемы геомеханики сильно сжатых пород и массивов» (г. Владивосток, 2019 г.).

Автор выражает благодарность своему научному руководителю, чл.–корр. РАН, д-ру техн. наук Рассказову И.Ю., д-ру техн. наук Курсакину Г.А., д-ру геол.-минер. наук Саксину Б.Г., канд. техн. наук Потапчук М.И. и другим коллегам из ИГД ДВО РАН за помощь и ценные советы при написании диссертационной работы, а также руководителям и специалистам АО «ГМК «Дальполиметалл» за содействие в организации экспериментальных шахтных исследований и внедрении в производство полученных научных результатов.

1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОБЛЕМЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ОТРАБОТКЕ УДАРООПАСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

1.1. Ретроспективный анализ проблемы удароопасности в мире и на рудниках Дальнего Востока России

Разработка месторождений полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях и на больших глубинах неизбежно сопровождается высоким уровнем горного давления, которое проявляется в таких опасных динамических формах как сдвигание и обрушение, внезапные выбросы породы и газа, стреляния, вывалы и толчки, а также горные и горно-тектонические удары. Отличительной чертой динамических проявлений горного давления и в особенности – горных и горно-тектонических ударов – является их мощная разрушительная сила и внезапность. Нередко они наносят большой экономический и социальный урон горнодобывающим предприятиям, а в отдельных случаях приводят к просто катастрофическим последствиям.

Проблема удароопасности в мировой горной отрасли существует уже более 120 лет. Сильные динамические проявления горного давления систематически регистрируются на рудниках и в шахтах США, Канады, Австралии, ЮАР, Чили, России, Индии, Китае и в других стран Европы и мира.

Первые данные о сильных проявлениях горного давления, зафиксированных на оловянных рудниках Англии в Уайтхейвене, относятся к 1738 году [1]. Во второй половине XIX века сильные проявления горного давления начали регистрироваться при отработке угольных месторождений в странах Западной Европы. С этого времени проблеме горных ударов стали уделять все более возрастающее и пристальное внимание по всему миру.

Первый горный удар в Индии был отмечен в 1898 году в Коларском районе на золотодобывающем руднике «Ургаум» на глубине 320 м [35]. На сегодняшний день «Ургаум» является одним из самых глубочайших рудников в мире.

В 1930 году на другом руднике Коларовского района «Майсор» произошел сильный горный удар, охвативший площадь шахтного поля по вертикали 374 метра. В результате проявления на поверхности в зданиях образовались трещины, а сотрясения в массиве ощущались в радиусе 16 км. Всего после первого самого сильного удара в течение месяца сейсмостанцией зарегистрировано 156 толчков, 56 из которых были зафиксированы в течение 32,5 часов [7, 10]. После горного удара кварцевая руда в очистных забоях отрывалась кусками от горного массива и разлеталась по выработкам. В результате проявления 16 человек погибли и четверо были тяжело ранены.

В 1954 на ещё одном из самых глубоких золотодобывающих рудников Индии «Чемпион-Риф» произошел горно-тектонический удар, повредивший более 100 зданий на поверхности, а с 1962 по 1966 гг. зафиксирована серия горных ударов, также вызвавших крупномасштабные разрушения и нанесших внушительный экономический ущерб [7, 10].

В США опасные динамические проявления горного давления регистрируются уже более 70 лет на глубоких свинцово-серебряных рудниках на севере штата Айдахо в районе города Кёр-д'Ален. За период с 1978 по 1993 гг. выявлено 73 горных удара, в результате которых погибло 5 шахтеров. Но проявления горного давления могут не только приводить к гибели людей, но и нести крупный экономический ущерб горному производству. Когда в 1983 г. на одной из угольных шахт запада США произошел горный удар, он разрушил более 40 щитовых крепей длинных очистных забоев и вывел из строя вспомогательный штрек действующей очистной панели [35].

Горные удары в Канаде впервые были зарегистрированы при разработке золоторудного месторождения в Онтарио в 1932 г., а в 1957 г. там же зафиксирован мощный горный удар с сейсмической энергией 5×10^4 МДж [125]. 14 августа 1964 года в Канаде зарегистрирован крупнейший за всю историю горный удар с радиусом действия 2600 км. После этого события удароопасный рудник был закрыт [35].

На золотодобывающих предприятиях ЮАР по мере увеличения объемов добычи золота число горных ударов с 1908 по 1918 гг. увеличилось более чем в 30 раз (с 7 до 223), а в 1975 году на 31 золотодобывающем руднике было зарегистрировано более 680. В 80-е годы XX века на руднике «Буффельсфонтейн»

(ЮАР) регистрировалось более 25 динамических событий в месяц силой до 4,5 бала по шкале Рихтера. В 1975 г. в ЮАР число погибших в результате горных ударов составило 73 человека (55 % от общего числа летальных исходов), а в 1979 г. уже 62 % со смертельным исходом [35].

На угольных шахтах Китая, начиная с 1950–60 гг., горные удары сопровождаются сотрясениями земной поверхности и разрушением домов. Например, на Си-Шаньском месторождении 3 августа 1959 г. и 10 марта 1964 г. в результате сильных геодинамических явлений было разрушено более 80 домов. Сейсмостациями Пекина регистрировались горные удары на шахте «Монтего», расположенной в 70 км от них [7, 123]. Как отмечает профессор А. С. Батугин, за весь период наблюдений в Китае горные удары были зарегистрированы на 142 угольных шахтах, расположенных в 17 провинциях [56, 150].

Отдельно стоит отметить случаи регистрации крупнейших горных ударов в Европе [7, 41].

В Австрии на цинково-свинцовом руднике «Райбл» (Тирольское месторождение) в 1929 и 1930 годах зарегистрированы горные удары в участках, где десятилетиями не велись очистные работы. Они сопровождались сильным сотрясением массива. Гул от мощных проявлений горного давления был слышен даже в радиусе 15 км.

В ГДР 22 февраля 1958 года на шахте «Херинген» зафиксирована серия горно-тектонических ударов с радиусом действия 1000 км и разрушениями на поверхности, похожими на последствия 8-ми балльного землетрясения.

Во Франции (Лотарингия) на железорудном месторождении после горного удара с радиусом действия более 400 км на поверхности появились трещины шириной до 1 м. В результате прохождения сейсмической волны в выработках были сдвинуты с места предметы весом более 15 т, и разрушены целые выемочные участки шахтного поля.

В Чехии на руднике «Пршибрам» за период с 1910 по 1960 гг. отмечены мощные проявления, похожие на землетрясения. В 1980 г. на шахте «Анна» зарегистрирован сильный горный удар с силой 5,5 баллов по шкале MSK-64 и расположением гипоцентра на глубине 1300 м. После закрытия и затопления шахт в Чехии после 90-х годов в них было зафиксировано более 15 толчков [7].

Впервые горные удары в СССР были зарегистрированы 80 лет назад при разработке шахт каменного угля Кизеловского бассейна [35, 73]. Вмещающие породы (кварцевые песчаники) и уголь данного месторождения характеризуются повышенной упругостью и прочностью. При этом отмечается также высокая тектоническая нарушенность горного массива.

На рудных месторождениях СССР первые горные удары были отмечены в начале 60-х годов прошлого века. При разработке Таштагольского, Октябрьского, Южно- и Североуральского бокситового, Хибинского и Ловозерского (Кольский полуостров) и месторождений железной руды в Хакасии и Горной Шории зафиксирован весь спектр динамических проявлений от стреляний пород до собственно горно-тектонических ударов с энергией от 10^8 до 10^{12} Дж [35].

К девяностым годам в России числилось 18 склонных и 43 удароопасных месторождения. За период с 1970 по 1994 год в России было зарегистрировано более 380 случаев горных и микроударов, продолжающих увеличиваться с понижением глубины отработки [35].

Также, по данным ВНИМИ, горные удары отмечены на месторождениях Кузбасса (5470 динамических и газодинамических явлений), Воркуты и на отдельных шахтах Донбасса [12, 20, 24].

На Кольском полуострове крупные горные удары выявлены в районах Хибинского и Ловозерского массивов. В августе 1999 года на шахте «Умбозеро» зафиксирован мощный горный удар. Объем разрушения составил 650 м^3 . На поверхности ощущалось землетрясение в 8 баллов. Сильные горные удары в Хибинском районе также регистрировались на руднике «Кировский» и карьере «Центральный» [35, 44, 48].

На сегодняшний день в России насчитывается около 50 удароопасных и склонных к горным ударам месторождений [39, 86, 129].

За последние 30 лет с понижением глубины отработки количество динамических проявлений горного давления на различных рудных месторождениях России значительно увеличивается [32, 33, 95].

Проблема горного давления для рудников Дальневосточного региона является актуальной уже более 40 лет [95] – таблица 1.1.1.

Таблица 1.1.1 – Опасные и склонные к горным ударам рудные месторождения Дальнего Востока

Месторождение (рудник)	Глубина по условию удароопасности, м	Степень удароопасности месторождения	Характер динамических проявлений
Николаевское («Николаевский»)	700	Опасное	Стреляние пород, толчки, горные удары, горно-тектонические удары
Антей («Глубокий»)	500	Опасное	Стреляние пород, толчки, горные удары, горно-тектонические удары
Южное («Южный»)	180	Опасное	Стреляние пород, толчки, горные удары
Перевальное («Перевальный»)	600	Опасное	Стреляние пород, внешние признаки удароопасности
Партизанское («Второй Советский»)	400	Опасное	Стреляние пород, внешние признаки удароопасности
Восток-2 («Восточный»)	500	Склонное	Внешние признаки удароопасности
Интернациональное («Интернациональный»)	700	Склонное	Внешние признаки удароопасности
Южно-Хинганское («Поперечный»)	300	Склонное	Готовится к освоению
Забывтое	250	Склонное	Готовится к освоению
Мало-Тулукуевское	500	Склонное	Готовится к освоению

Впервые динамические проявления горного давления на Дальнем Востоке были зарегистрированы при проходке подготовительно-разведочных выработок и стволов на руднике «Николаевский». В последующие годы горные удары отмечались на Южном полиметаллическом и Хинганском месторождении олова [95].

На сегодняшний день 10 рудников Дальнего Востока являются опасными и склонными к горным ударам, таблица 1.1.1 [129]. На одних рудниках регистрируются все динамические формы проявлений горного давления, вплоть до мощных горных и горно-тектонических ударов. На других выделяются лишь редкие случаи, но с понижением глубины прогнозируется значительный рост числа опасных проявлений [95]. Такие месторождения Дальнего Востока, как Южно-Хинганское (рудник «Поперечный»), Забытое и Мало-Тулукуевское, только готовятся к освоению, и пока разработка на них не достигла удароопасных условий (таблица 1.1.1).

Первые микроудары на Южном месторождении зарегистрированы на глубинах 120 и 175 м в 1986 и 1986 годах, соответственно. Всего с 1986 по 1991 год на месторождении было зафиксировано 6 случаев горных ударов, более 20 толчков, 150 стреляний. Анализ условий и причин произошедших горных ударов в массиве Южного месторождения отражает их реализацию при относительно небольшой глубине, а также характеризует практически полное отсутствие признаков шелушения и интенсивного заколообразования при ведении горных работ выше дна долин на небольшой глубине (120–300 м), где преимущественно действует гравитационное поле напряжений [27]. В похожих условиях регистрировались горные удары в 1999 году на Хибинском руднике «Умбозеро» (Кольский полуостров) [43, 48].

На руднике «Глубокий» (месторождение Антей) первые динамические проявления горного давления отмечены ещё при строительстве рудника, при проходке подготовительно-разведочных выработок и стволов. По мере понижения горных работ и увеличения площади подработки, а также с изменением технологии отработки с разделением очистных блоков на полублоки, частота и сила этих проявлений значительно увеличивалась. Если с 1988 по 2002 год регистрировалось не более 20 динамических проявлений в год (в среднем 4–9), то к 2008 году их число выросло более чем в 10 раз (125 случаев). В 2015 году было зафиксировано уже более 200 случаев проявления горного давления [5, 18, 94].

Хинганское месторождение оловянной руды с 1945 г. обрабатывалось открытым способом, а с 1964 г. – подземным. Динамические проявления здесь начали отмечаться не сразу, а постепенно с понижением глубины отработки. Толчки и микроудары начали регистрироваться с глубины 500 м. Наиболее мощное событие было зафиксировано 5 марта 1989 года на пересечении с тектоническим активным нарушением мощностью полметра, представляющим из себя концентратор напряжений [95].

Одно из наиболее удароопасных месторождений Дальнего Востока – месторождение Николаевское, где геомеханическая ситуация остается крайне сложной и на сегодняшний день. С 2011 года на Николаевском месторождении зарегистрировано 52 толчка, 107 случаев стреляния, 155 вывалов и многочисленные случаи шелушения и заколообразования массива горных пород.

Наибольшее число толчков регистрировалось в 2011, 2012, 2016, 2019 и 2020 годах (рисунок 1.1.1).

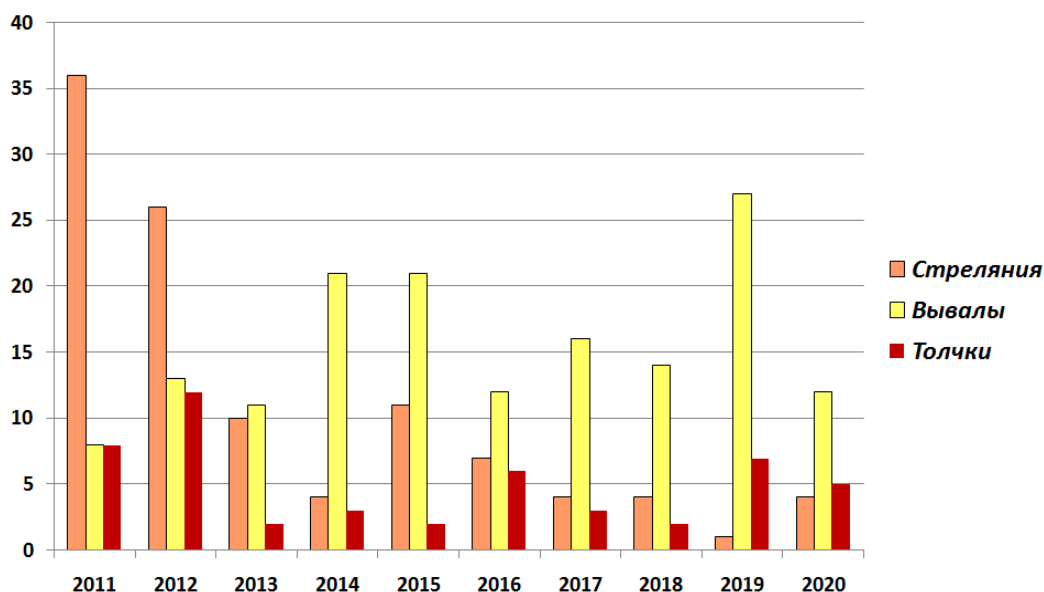


Рисунок 1.1.1 – Распределение числа динамических проявлений горного давления (толчки, стреляния, вывалы) на Николаевском месторождении с 2011 по 2020 г.

Несмотря на общее количественное снижение динамических проявлений горного давления в 2013–2018 годах, с 2015 года на руднике наблюдается качественное изменение и усложнение геомеханической ситуации. В IV и I квартале 2015 и 2016 годов на месторождении отмечено 25 динамических проявлений горного давления, включая серию разрушительных толчков. Последствия наиболее крупных из них, зарегистрированных в октябре 2015 и марте 2016 года, представлены на рисунке 1.1.2.

Кратко подводя итог, проблема динамических проявлений на рудниках и шахтах известна во всем мире на протяжении нескольких веков, а для нашей страны актуальна уже более 80 лет. На месторождениях Дальнего Востока России также планируются и ведутся горные работы на глубоких горизонтах в сложных удароопасных условиях. Одним из наиболее удароопасных месторождений Дальнего Востока является Николаевское месторождение, где впервые динамические признаки проявлений горного давления были отмечены в 70-е годы, а, начиная с конца 2015 года, наблюдается резкое усложнение геомеханической обстановки.



Рисунок 1.1.2 – Последствия геодинамических явлений, зарегистрированных 30.10.2015 и 25.03.2016 на Николаевском месторождении

Таким образом, детальное исследование особенностей проявлений горного давления, а также выявление причин горных ударов на Николаевском месторождении является важной и актуальной научной задачей.

1.2. Анализ существующих представлений о механизме и причинах формирования удароопасных ситуаций на рудных месторождениях

В горной отрасли проблема удароопасности существует в мире уже почти 300 лет. На сегодняшний день в науке имеется внушительный объем результатов теоретических и практических исследований факторов и причин возникновения горных и горно-тектонических ударов в горном массиве при ведении подземных работ. Значительный вклад в исследование этих вопросов внесли не только российские исследователи С.Г. Авершин, И.М. Петухов, К.Н. Трубецкой, И.Ю. Рассказов, А.А. Еременко, А.А. Козырев, В.Н. Опарин, М.В. Курленя, В.С.

Куксенко, А.В. Ловчиков, Макаров В.В., Серяков В.М., Г.А. Соболев, А.Д. Завьялов, Б.Г. Тарасов, но и иностранные ученые Н.Г. Кук, М.Д.Г. Саламон и другие [119, 120, 140, 141, 142, 147].

В геомеханике существует большое разнообразие гипотез о механизме возникновения горных ударов. Это связано с тем, что отсутствует общепринятая теория разрушения твердых тел. Среди российских ученых отдельно можно отметить гипотезы И.М. Петухова и С.Г. Авершина.

С.Г. Авершин выдвигал следующую гипотезу: горные удары возникают на участках перенапряжения при высоком опорном давлении, которое оказывает разрушительное воздействие на горный массив, и в результате этого происходит высвобождение больших запасов упругой энергии [1].

В России общепризнанной является точка зрения проф. И.М. Петухова. Согласно его представлениям, горные удары в массиве реализуются в тот момент, когда происходит превышение притока энергии окружающих горных пород над силами, образующими разрушающийся объем пород. Объем выделяемой избыточной энергии придает разлетающимся хрупким кускам породы кинетическую энергию, и, как следствие, приводит к выбросу породы в сторону целика или почвы и кровли очистного пространства [74, 75].

Понимание механизма формирования горных ударов невозможно без изучения всех факторов, влияющих на удароопасность. Все известные факторы можно разделить на две группы: природные и техногенные.

К природным факторам относятся естественный уровень полей напряжений земли, геодинамический фактор, а также группа различных геологических факторов: физико-механические свойства пород, разломные структуры, контакты пород и различные их включения.

До начала отработки месторождений породный массив уже находится в напряженном состоянии, называемом естественным или природным. От уровня естественных полей напряжений зависят формы, места и масштабы динамических проявлений горного давления.

Исследование природных полей напряжений представляет собой одну из важнейших задач науки, которую необходимо заблаговременно решать до начала отработки месторождений для безопасного ведения горных работ.

В земной коре могут присутствовать два типа напряжений: вертикальные и горизонтальные. Вертикальные напряжения, по-другому называемые гравитационными, определяются силой гравитации собственного веса пород. Горизонтальные, действующие в двух взаимно перпендикулярных направлениях, характеризуют тектонические процессы, происходящие в земной коре [58].

На подавляющем большинстве рудных месторождений России и в том числе на месторождениях Дальнего Востока зарегистрировано наличие высоких уровней тектонических напряжений, до нескольких раз превышающих значения гравитационных напряжений [95].

Определяющее влияние на формирование природного напряженно-деформированного состояния породного массива месторождений обуславливают геодинамические процессы, происходящие в земной коре. Характер распределения полей напряжений в массивах рудных месторождений зависит от особенностей их блоково-тектонического строения, которое тесно связано с тектонически активными крупными разломами, играющими внушительную роль в региональной геодинамической системе.

Крупные динамические проявления горного давления на глубоких горизонтах рудных месторождений Дальнего Востока также реализуются на фоне повышенной геотектонической активности, требующей отдельного изучения [95]. В этой связи обязательным условием для решения проблемы предотвращения горных ударов на месторождениях, приуроченных к тектонически активным районам, является анализ региональной геодинамической обстановки.

Среди природных факторов значительное влияние на удароопасность массива горных пород оказывают также геологические факторы. В наибольшей степени уровень удароопасности породного массива формируется при превышении прочностных характеристик горных пород [79]. Чаще всего горные удары возникают в породах прочных и средней степени прочности [30].

Согласно В.А. Мансурову, опасными концентраторами напряжений также могут являться: прочные жесткие породы и их прослойки; контакты горных пород; лежащие бока, внутренняя дуга и окончания тектонических нарушений; дайки и другие структурные неоднородности [59].

Большое значение в структурно-тектоническом строении имеют также глубинные разломы, определяющие блочное строение земной коры. Именно из-за трения и подвижек по региональным разломам в естественно-природном поле напряжений зачастую возникают толчки и горные удары на месторождениях полезных ископаемых [30, 42, 50, 112].

Кроме природных факторов значительное влияние на возникновение динамических проявлений горного давления в массиве горных пород оказывают также техногенные (или технологические) факторы [95].

К техногенным факторам причисляют: тип и параметры применяемой системы разработки; объёмы выработанного пространства; конфигурация, а также способ проходки горных выработок и их ориентация в пространстве; способы крепления кровли; организация работы в забоях и другие технологические воздействия на горный массив при ведении очистных и взрывных работ. Чаще всего на рудных месторождениях опасные динамические явления происходят при определенных, крайне разнообразных сочетаниях технологических и природно-геологических условий.

Наблюдения за изменениями в породном массиве показывают, что большинство динамических проявлений инициируются техногенными взрывными работами [31]. Согласно А.М. Фрейдину, примерно 70 % опасных динамических проявлений горного давления регистрируются в первые сутки после проведения технологических взрывных работ. Впоследствии интенсивность событий прямо пропорционально уменьшается [132].

К числу удароопасных факторов также можно отнести техногенные сейсмические явления, регистрируемые с развитием индустриализации в последние годы всё чаще и чаще в верхних слоях геосферы. Проблеме техногенной сейсмичности уделяет внимание широкий круг специалистов. Этому явлению посвящены работы В.В. Адушкина, С.Б. Турунтаева, А.А. Козырева, М.А. Садовского, А. Мендецки, И.А. Турчанинова и других [23, 137].

Исторически проявления техногенной сейсмичности на подземных рудниках впервые были отмечены в конце XIX века на рудниках Южной Африки и Европы. В России десятки таких проявлений зарегистрированы на рудниках Талнаха, Кольского полуострова и Северо-Уральском бокситовом месторождении [3].

С 2015 года проявления техногенной сейсмичности начали наблюдаться на Дальнем Востоке. Первые проявления техногенной сейсмичности, а также сопутствующая им серия сильных толчков на глубоких горизонтах Николаевского полиметаллического месторождения, были зарегистрированы с 5 по 8 октября 2015 года. Активизация геодинамических процессов была вызвана подработкой нарушенного горными работами массива вдоль границ тектонического блока треугольной формы объемом более 5 млн. м³ [144].

Геомеханическая обстановка на Николаевском руднике значительно усложнилась в 2016 г., когда 25 марта в районе блока 40 зарегистрировано мощное геодинамическое явление, сопровождавшееся мощным звуковым проявлением и сотрясением всего шахтного поля, а также сейсмическими колебаниями, отмеченными на поверхности (рисунок 1.2.1) [149].



Рисунок 1.2.1 – Разрывные нарушения в массиве Николаевского месторождения, образованные в результате проявления техногенной сейсмичности 25.03.2016 г.

В результате этого явления разрушены крепь и контур горных выработок на четырёх горизонтах (–375 м, –390 м, –406 м и –420 м). Объем разрушенной горной массы составил 400 м³. Описываемое явление совпало по времени с землетрясением магнитудой 4 балла в пос. Каменка на побережье Японского моря и привело к поднятию почвы на 10–12 см и образованию в массиве открытых разрывов и трещин (рисунок 1.2.1) протяженностью десятки метров, пространственно совпавших с элементами тектонической структуры месторождения.

Целая серия проявлений техногенной сейсмичности наблюдалась также в ноябре 2016 и 2018 гг., включая наиболее крупное геодинамическое событие с энергией $19,4 \cdot 10^4$ Дж, зарегистрированное в районе блока ОПБ.

Таким образом, удароопасность горных предприятий всегда определяется совокупностью природных и техногенных факторов. Природные факторы здесь играют фундаментальную роль, а техногенные служат в роли «спускового крючка» и в результате их горнотехническая система теряет равновесие [35, 69, 107]. Поэтому для безопасной отработки месторождений необходимо учитывать весь комплекс перечисленных факторов удароопасности. Только в этом случае возможно разрабатывать с точки зрения безопасности эффективные технологии отработки месторождений и мероприятия по предотвращению горных ударов.

На сегодняшний день остается недостаточно изученным влияние комплекса природно-техногенных факторов на удароопасность месторождений Дальнего Востока и, в особенности, на Николаевском месторождении, где в последние годы регистрируются проявления техногенной сейсмичности, и наблюдается усложнение геомеханической обстановки. Для объективной оценки степени удароопасности участков Николаевского месторождения и в целях повышения безопасности горных работ необходимо осуществить обоснованный выбор методов и выполнить комплекс геомеханических исследований.

1.3. Обзор методов и технических средств изучения геомеханического состояния массива горных пород

Изучение и определение геомеханического состояния массива горных пород является сложной задачей, которая сводится к тому, чтобы выявить в горном массиве напряженные участки и оценить их склонность к хрупкому динамическому разрушению. Все существующие на сегодняшний день методы определения напряжений в горном массиве [52, 57, 63, 78, 125, 136] можно разделить на четыре группы: структурно-геологические, геомеханические, аналитические и геофизические.

Структурно-геологические методы основаны на общем анализе геологической и геотектонической обстановки и особенностей массива методами геодинамического районирования, а также с помощью визуального осмотра горных выработок, деформируемых под действием горного давления.

Метод геодинамического районирования (ГРМ) объединяет комплекс тектонофизических и геоморфологических методов [9, 11], позволяющих определять блочно-тектоническое строение земной коры в районе месторождения и заблаговременно косвенно оценивать геодинамику и естественное поле напряжений горного массива еще до начала его освоения. Для рудных месторождений изучение геодинамики имеет особенное значение, так как, по данным российских и иностранных геологов, более 80 % месторождений имеют блочное строение и контролируются глубинными разломами [72, 127].

Метод визуальных наблюдений, который можно охарактеризовать как структурно-геологический метод локального характера, позволяет быстро и на большой площади оценить характер и интенсивность проявлений горного давления на обнажениях выработок [19]. Применение метода визуальных наблюдений, несмотря на кажущуюся простоту, требует высокой квалификации и опыта, позволяющего чётко установить закономерности и определить причины и интенсивность процессов, происходящих в горном массиве под действием горного давления [66, 138].

Наряду со структурно-геологическими, на месторождениях широко распространено применение целого ряда геомеханических методов, применяемых

для оценки напряженного состояния выработок, целиков и других участков породного массива.

Геомеханические методы в основном включают в себя непосредственное измерение деформаций в локальном участке горного массива с последующим аналитическим вычислением напряжений. Несмотря на то, что они характеризуются довольно высокой точностью определения направлений действия компонент напряжений, в то же время применение данных методов может быть весьма трудоемким. Одним из наиболее распространенных деформационно-геомеханических способов определения концентраций напряжений является метод целевой разгрузки, основанный на измерении упругих деформаций [105, 136].

Широко применяемым геомеханическим методом, основанным на изучении поведения горных пород при бурении скважин, является метод дискования керна, дающий качественную оценку действующих напряжений [13, 26, 39]. Установление категории удароопасности данным методом осуществляется с помощью анализа номограмм, строящихся на основе данных, полученных при изучении напряженного состояния породного массива вокруг выработок.

Зачастую применение геомеханических методов требует дополнительного лабораторного определения физико-механических свойств образцов горных пород с применением уникальных трехосных испытательных систем, обеспечивающих объемное нагружение. Также оценка напряженно-деформированного состояния породных массивов на образцах может осуществляться с помощью исследований акустически-эмиссионного эффекта памяти, называемого эффектом Кайзера [139, 154].

Аналитические методы изучения НДС, основанные на расчетах, получили распространение в последние годы с развитием компьютерных технологий. Данные методы позволяют производить количественную и качественную оценку напряженно-деформированного состояния горного массива. К аналитическим методам относятся: метод конечных разностей, метод дискретных элементов, метод числового многообразия, метод анализа разрывных деформаций, моделирование способом фотоупругости и другие [78, 118].

Среди большого многообразия аналитических методов для изучения полей напряжений наибольшее применение в горной науке получили методы

математического моделирования конечных и граничных элементов (МКЭ и МГЭ). Это объясняется универсальностью программного обеспечения и сравнительно низкой трудоемкостью при моделировании [128, 156]. Оба метода позволяют рассчитывать упругие и неупругие задачи, как в однородных, так и в неоднородных массивах путём решения системы алгебраических линейных уравнений. При этом использование метода конечных элементов в вычислительном плане более выгодно, чем применение метода граничных элементов [106].

В качестве исходных данных в методе конечных элементов используются деформационно-прочностные свойства горных пород, слагающих массив, особенности его структурно-тектонического строения, а также задаются начальные напряжения, действующие в массиве [106].

Наиболее часто численное моделирование выполняется в плоской постановке задачи в силу низкой степени трудоемкости [14, 17, 67]. Но при этом наиболее точные результаты исследований можно получить только при объемном моделировании, которое в полной мере учитывает структурно-геологическое строение массива и технологию отработки запасов. Построение же объемных моделей (в отличие от плоских) является более трудоемким процессом [84, 131].

Процессы, происходящие в горном массиве, сложенном тектоническими нарушениями и породными контактами, особенно в местах с высокой геодинамической активностью и техногенной сейсмичностью [23, 137], очень сложно описать расчетными аналитическими методами. В таких случаях необходим непрерывный геомеханический мониторинг изменяющихся во времени и пространстве естественных и техногенных полей напряжений и очагов разрушения в горном массиве. Для достижения этой цели применяют инструментальные геофизические методы, основанные на дистанционном контроле и измерении электромагнитных, оптических и акустических излучений, генерируемых горным массивом при образовании в нём трещин и изменении напряженного-деформированного состояния.

В мире насчитывается более 100 видов геофизических методов, которые подразделяются на группы. Среди геодезических методов выделяются как локальные методы, позволяющие контролировать сравнительно небольшие участки массива (ультразвуковой, метод инфракрасной радиометрии, метод

регистрации ЕЭМИ и др.), так и региональные методы, дающие контроль относительно больших участков массива, расположенных на больших базах, на площади до нескольких десятков километров (сейсмический, акустический, деформационный метод и другие) [73, 124].

В зависимости от диапазона частот геофизические методы подразделяются на сейсмический (до 800 Гц), сейсмоакустический и акустический (от 800 до 16000 Гц), а также ультразвуковой (свыше 16000 Гц).

Сейсмические методы применяют при расположении сети сейсмоприемников на расстояниях от 200 м, что позволяет исследовать свойства и состояние породного массива на больших расстояниях, соизмеримых с размерами месторождений. В России сейсмический метод широко применяют на Таштагольском железорудном, Северо-Уральском бокситовом, Хибинских апатитовых и других удароопасных месторождениях.

К сейсмоакустическим и акустическим методам относятся автоматизированные многоканальные системы контроля горного давления, позволяющие измерять координаты и энергию очагов трещинообразования, а также различные параметры акустических полей. В отличие от сейсмического, акустические методы позволяют выявлять очаги акустической эмиссии на начальных стадиях формирования опасных динамических проявлений горного давления [107]. По-другому эти очаги также называют акустически-активными зонами (ААЗ), выделение которых на ранних стадиях позволяет в режиме реального времени получать информацию о процессах накопления напряжений и деформаций в горном массиве [89].

Сейсмоакустические методы контроля горного давления в Российской Федерации применяют на целом ряде удароопасных месторождений, среди которых можно выделить СУБР («Очаг»), Норильские рудники «Таймырский» и «Октябрьский» («GITS-S», «Релос», «ISS»), а также рудники «Николаевский», «Глубокий» и объединенный «Кировский» ФОСАГРО АПАТИТ, на которых установлена разработанная в ИГД ДВО РАН система мониторинга «Prognoz-ADS» [97].

Исследования описываемым методом проводятся на территории не только нашей страны, но и во многих других странах мира, таких как Китай, США, Чехия, Польша [143, 152, 153].

К достоинствам сейсмоакустического и акустического методов относят простоту монтажа датчиков и аппаратуры, оперативность и безопасность удаленного контроля удароопасность.

С помощью ультразвуковых геофизических методов определяют прочностные, а также упругие (коэффициент Пуассона, модуль сдвига и упругости) и неупругие (коэффициенты внутреннего трения, пластичности, вязкости) физико-механические свойства горных пород. Ультразвуковые методы позволяют эффективно оценивать уровень напряжений в целиках [73].

Для контроля горного давления широко применяют деформационные геофизические методы, основанные на регистрации деформаций, генерируемых в процессе ведения горных работ в напряженном массиве [6, 122]. Недостатком данного метода является не только его трудоемкость, но и получение только качественных характеристик распределения напряжений.

Среди геофизических методов стоит выделить метод электромагнитной индукции [53, 104]. Данный метод позволяет с помощью наведения электрического поля изучать напряженно-деформированное состояние в забоях сопряженных и одиночных выработок и получать качественную картину распределения повышенных концентраций напряжений [54].

Одним из новейших современных способов контроля горного массива является метод лазерного 3D сканирования, позволяющий оценивать напряженное состояние и удароопасность выработок без бурения скважин, что обуславливает низкие трудозатраты и повышение безопасности работ [45, 70].

В последние годы всё чаще используют и создают комплексные системы геомеханического мониторинга, являющиеся одним из наиболее перспективных вариантов в решении проблемы горного давления [2, 18, 62, 134, 146, 151]. В состав единой интегрированной наблюдательной сети комплексных систем могут входить не только микросейсмические, деформационные и акустические измерительные приборы регионального уровня, а также дополнительное оборудование для локального контроля удароопасности горного массива [63, 91, 134].

Применение систем комплексного геомеханического мониторинга становится особенно актуальным в последние годы с развитием проблемы техногенной сейсмичности на действующих рудниках.

Таким образом, большое многообразие используемых и разработанных на сегодняшний день методов и технических средств оценки геомеханического состояния горного массива обусловлено не только многочисленными природными и техногенными факторами удароопасности, но и необходимостью выявления зон опасных концентраций напряжений заблаговременно до начала, так и в процессе ведения горных работ. Только комплексное использование разнородных методов [34, 46, 64] позволяет максимально эффективно снижать уровень опасных концентраций напряжений в массиве и оперативно применять меры для обеспечения безопасной отработки удароопасных месторождений.

1.4. Принципы управления горным давлением при отработке удароопасных месторождений сложной тектонической структуры

Известные в настоящее время и включённые в нормативные документы результаты исследований в области прогноза и предотвращения горных ударов содержат целый комплекс технических и организационных мер для обеспечения безопасности отработки удароопасных месторождений. В основе этих разнообразных мер лежит обеспечение таких порядка и способов ведения горных работ, при которых в массиве горных пород максимально исключаются чрезмерные концентрации механических напряжений и снижается опасное влияние горного давления на горные выработки и конструкции. Вместе с тем, как установлено многими учеными [29, 39, 77, 76, 85], конкретное научно-техническое наполнение обосновываемых и рекомендуемых мер может существенно зависеть от условий освоения месторождений, от локальных и региональных их особенностей. В частности, одним из существенных факторов значительной неопределённости процесса научного обоснования мер геомеханической безопасности Николаевского месторождения является ряд выявленных особенностей: большая глубина отработки, высокий уровень начальных

напряжений в массиве, повышенная тектоническая и геодинамическая активность, а также сложное структурное и разломно-блоковое строение.

Поэтому при обосновании и разработке методов и средств предотвращения опасных горнодинамических явлений в условиях Николаевского месторождения в зависимости от горно-геомеханической ситуации может потребоваться решение следующих методологических задач:

1) обоснования и использования в определённых горно-геомеханических условиях необходимого и достаточного состава организационно-технических мер предотвращения горных ударов из числа известных;

2) адаптации и определения рациональных параметров известных мер безопасности применительно к конкретным горно-геологическим и геомеханическим условиям;

3) разработки новых перспективных способов снижения удароопасности, основанных на направленном управлении горным давлением.

Все противоударные мероприятия на сегодняшний день классифицируются, главным образом, по масштабу воздействия на горный массив. Выделяют региональные и локальные мероприятия. Для региональных мер объектом применения является шахтное поле, горизонт или очистной блок, для локальных – отдельные участки выработок, целики и другие конструктивные элементы системы разработки [76, 77].

Ниже представлен систематизированный свод наиболее часто применяемых профилактических мер безопасности *регионального уровня*, уместный для рассмотрения в целях последующего использования в данных условиях:

– Изменение поперечного сечения выработок. Одно из наиболее эффективных и легко реализуемых профилактических мероприятий – придание забою или сечению выработки шатрообразной формы. Шатрообразная форма поперечного сечения выработки снижает уровень напряжений в местах интенсивного заколообразования и стреляния выработки.

– Проведение капитальных выработок преимущественно по направлению действия максимальных сжимающих напряжений. Участки разрушения на контуре выработки всегда параллельны направлению действия максимальных сжимающих напряжений. При высоких горизонтальных сжимающих напряжениях разрушения

происходят в кровле и почве горизонтальных выработок. Поэтому необходимо избегать расположения выработок перпендикулярно действию максимальных сжимающих напряжений [39].

– Обеспечение безопасного порядка отработки выемочных участков и блоков. Раскройка месторождения на шахтные поля, а также порядок и последовательность отработки рудных тел, слоев и другие вопросы должны решаться из условия обеспечения минимальных концентраций напряжений по возможности без образования целиков, острых углов и выступов в массиве вблизи мест ведения очистных работ [39].

– Закладка выработанного пространства. Является одним из наиболее эффективных способов управления горным давлением, способствуя снижению горного давления и обеспечивая устойчивость массива горных пород [47, 68]. Зачастую закладка значительно удорожает производство. Поэтому чаще всего её применяют лишь в тех случаях, когда другие, более дешевые способы управления горным давлением в данных горно-геологических условиях не могут обеспечить безопасную и эффективную добычу [49].

Наиболее изученные профилактические меры безопасности *локального уровня* включают в себя:

– «Отстой» выработок. Относится к пассивным мерам борьбы с горными ударами, позволяя в отдельных случаях снизить удароопасность массива. Мера рассчитана на проявление массивом деформационных свойств. После возникновения в массиве трещин, параллельных поверхностям обнажения, наблюдается прекращение динамических проявлений на контуре выработки [95].

– Крепление выработок. Также представляет собой пассивную форму борьбы с проявлениями горного давления, которая предохраняет выработки от возможных последствий горных ударов. Крепление выработок широко применяют на удароопасных рудниках, но значительно удорожаются проходческие работы [95].

– Бурение разгрузочных скважин. В процессе бурения на стенках и в забое скважин возникает предельно-напряженное состояние, способствующее разрушению межскважинных перемычек. После саморазрушения под действием высоких напряжений межскважинных целиков происходит релаксация (разгрузка) массива горных пород [113, 114]. Эффективность бурения разгрузочных скважин

зависит от правильного выбора её параметров: глубины и диаметра скважин, а также от ширины межскважинного целика (расстояния между скважинами) [61, 80, 155].

– Щелевая разгрузка. Разделка разгрузочной щели в сводовой части горизонтальной выработки позволяет не только предотвратить динамические проявления горного давления, но и повысить её устойчивость. Широкое применение щелевой разгрузки сдерживается, главным образом, из-за существенной сложности создания щелевой полости, так как для разделки щелей необходимо специальное оборудование.

– Камуфлетное (сотрясательное) взрывание. Это – наиболее часто используемый способ разгрузки краевых частей массива от высоких концентраций напряжений. Эффективность камуфлетного взрывания зависит от принятых параметров: глубины скважин (шпуров), расстояния между ними и величины заряда ВВ [121, 130]. Недостатком камуфлетного взрывания является необходимость бурения глубоких скважин (шпуров) и сильная зависимость от геомеханического состояния массива. В отдельных случаях данный метод используется вдоль швов геодинамически активных разломов. Эффективное использование данного метода возможно на основе результатов геодинамического районирования и при наличии на месторождении автоматизированных систем контроля горного давления [55, 89, 95].

Перечисленный выше набор известных мер безопасности в подавляющем своем большинстве включает в себя мероприятия, которые проектируются и реализуются заблаговременно до начала ведения горных работ. При этом обеспечить в полной мере безопасную отработку глубоких месторождений сложной тектонической структуры окажется гарантированно возможным лишь путём эффективной и оперативной разгрузки удароопасных участков при их выявлении и с условием использования непрерывного геомеханического мониторинга массива горных пород (в частности, – путём контроля акустически активных зон). Изложенный выше методологический подход, будучи проверенным экспериментально, может оказаться наиболее приемлемым для условий Николаевского месторождения, что рассматривается в качестве одной из главных задач диссертационного исследования.

1.5. Цель и задачи диссертационной работы

Выполненные в диссертации обзор и обобщение результатов имеющихся исследований показали, что влияние комплекса природных и техногенных факторов на удароопасность разрабатываемых породных массивов остается недостаточно изученным, в том числе – и на месторождениях Дальнего Востока России. Принимая во внимание рост числа и интенсивности динамических проявлений горного давления, а также проявлений техногенной сейсмичности, регистрируемых на глубоких горизонтах Николаевского месторождения в последние годы, возникает необходимость исследования причин и факторов, определяющих удароопасность данного месторождения, а также необходимость разработки и научного обоснования мер геомеханической безопасности в процессе горных работ.

Современный научный подход к решению проблемы горных ударов и техногенной сейсмичности при отработке месторождений предусматривает использование инструментальных методов в комплексе с натурными и аналитическими, позволяя тем самым нивелировать их недостатки и усиливать достоинства, а также максимально адаптировать научные методы исследований к условиям изучаемого Николаевского месторождения.

Таким образом, поставлены следующие цель и задачи диссертационной работы.

Цель диссертационной работы заключается в разработке и геомеханическом обосновании комплекса профилактических мер для безопасного ведения горных работ на глубоких горизонтах сложноструктурного полиметаллического Николаевского месторождения, опасного по горным ударам.

Для реализации идеи и достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

- изучить геомеханические, структурно-геологические и горнотехнические условия отработки глубоких горизонтов удароопасного Николаевского месторождения;

- установить закономерности изменения акустической активности в сложноструктурном массиве горных пород в их взаимосвязи с крупными динамическими явлениями и техногенной сейсмичностью;
- методом математического моделирования установить закономерности геомеханических процессов и оценить характер и степень влияния тектонической структуры на напряженно-деформированное состояние массива горных пород на различных стадиях отработки глубоких горизонтов месторождения;
- обосновать комплекс эффективных профилактических мероприятий и технологических решений для повышения безопасности горных работ и снижения риска геодинамических явлений.

Выводы по главе 1:

1. Анализ результатов предшествующих исследований показал, что удароопасное состояние участков массива горных пород определяется совокупностью природных и техногенных факторов. Природные факторы (высокий уровень первоначальных напряжений в участках земной коры, геодинамический и структурно-геологические факторы) играют базовую роль, а техногенные (большие объёмы выработанных пространств, воздействие на массив взрывными работами, применяемый тип системы разработки и т. д.) могут служить дополнительными факторами, в результате воздействия которых горнотехническая система теряет равновесие. Для безопасной отработки месторождений необходимо учитывать весь комплекс факторов удароопасности. Представляется, что только в этом случае возможно разрабатывать эффективные и безопасные технологии отработки месторождений и мероприятия по предотвращению горных ударов.

2. Современный научный подход к решению проблемы горных ударов характеризуется необходимостью измерений НДС массива горных пород и природно-техногенной сейсмичности, в связи с чем является целесообразным использование инструментальных методов исследований в комплексе с натурными и аналитическими, обеспечивая тем самым получение необходимого синергетического эффекта при изучении геомеханических процессов.

3. Известный набор технических и организационных мер для безопасной

отработки удароопасных месторождений в подавляющем своем большинстве содержит мероприятия, проектируемые и реализуемые заблаговременно до начала ведения горных работ. С развитием в последние годы геофизических методов исследований геомеханических процессов возникает возможность в режиме реального времени осуществлять непрерывный мониторинг изменения НДС массива горных пород и оперативно контролировать процессы разгрузки удароопасных участков при выявлении опасных (акустически идентифицируемых) зон. Особенно актуально это для условий сложноструктурного в геологическом отношении Николаевского месторождения, где в последние годы с углублением регистрируются проявления техногенной сейсмичности и наблюдается повышенная геодинамическая и тектоническая активность участков массива.

4. Поставлены задачи и цель диссертационной работы, включающие в себя изучение закономерностей распределения полей напряжений, выявление природных и техногенных факторов удароопасности и обоснование комплекса профилактических мер, повышающих безопасность ведения горных работ.

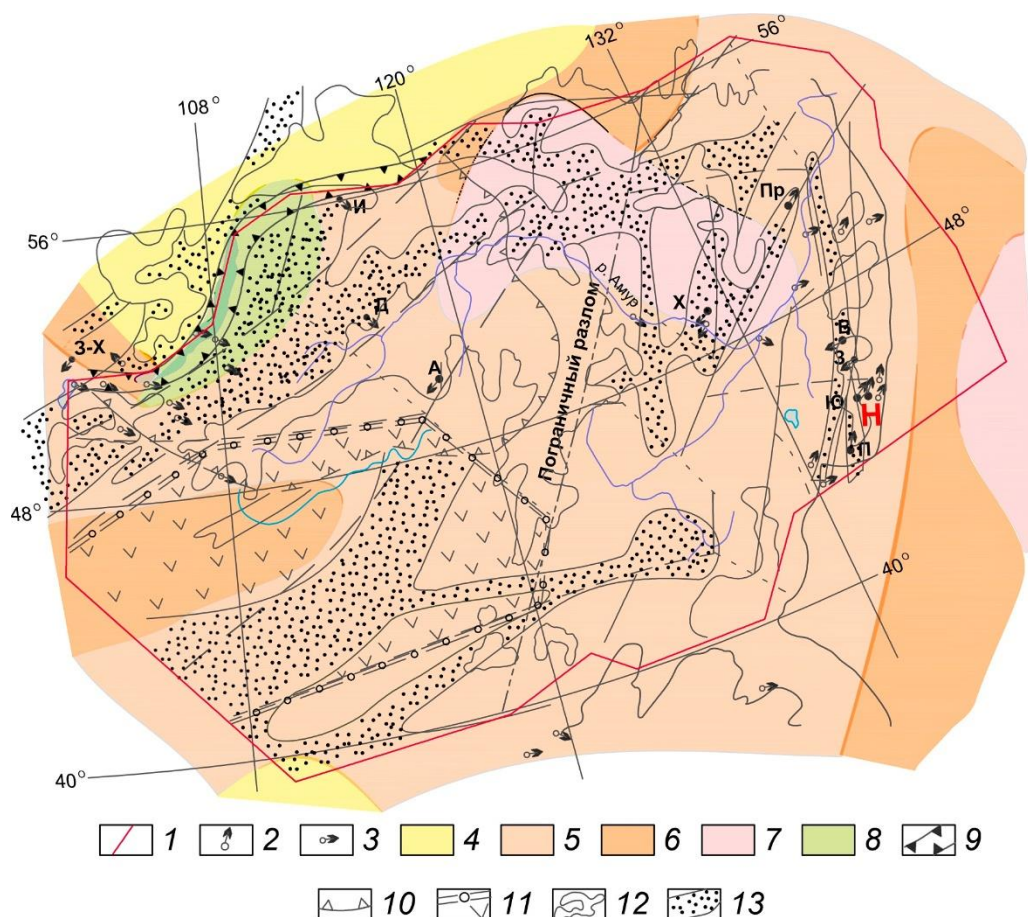


Рисунок 2.1.2 – Современное блоковое строение Амурской плиты

1 – сейсмогенерирующие разломы, ограничивающие Амурский геоблок; 2 – направление вектора главного горизонтального напряжения, установленного в выработках удароопасных месторождений: Н – Николаевское, Ю – Южное, 3 – Забытое, П – Партизанское, В – Восток-2, Пр – Перевальное, Х – Хинганское, А – Антей, Д – Дарасунское, И – Ирокиндинское, З-Х – Зун-Холбинское; 3 – направление вектора современных горизонтальных перемещений поверхности земной коры, установленное по данным GPS-измерений; 4–8 – области с разным геодинамическим режимом (по Леви, Шерману, 2007; современный этап): 4 – области тектонически нейтрального напряжённого состояния; 5 – области сжатия; 6 – области сдвига; 7 – области сжатия со сдвигом; 8 – области растяжения; 9 – Байкальская рифтовая зона; 10 – внешний контур Байкальского тектонического потока; 11 – относительно стабильный участок плиты со слабым проявлением позднего орогенеза; 12 – области интенсивного современного сжатия с прогнозируемой интенсивностью более 50 МПа, проявленные повышенной плотностью минимальных линеаментов рельефа земной поверхности (штрихов), 13 – области относительной тектонической нарушенности земной поверхности с прогнозируемой интенсивностью сжатия от 10 до 50 МПа, проявленные повышенной плотностью линеаментов;

На напряженно-деформированное состояние массива Амурской плиты оказывают влияние природные процессы, связанные с подвигом Тихоокеанской плиты под Евразию и столкновением Индо-Австралийской и Евразийской плит. Упомянутые процессы отражаются на Байкальской рифтовой зоне и глубоководной Япономорской впадине, с раскрытием которой связывают современную структуры Амурской плиты, сформированную в неогене. Специфичность напряженного состояния тектонически активного Амурского геоблока также определяется тем, что он располагается в районе вулкано-

сейсмической активности северо-восточной части Сино-Индонезийской области. Согласно исследованиям Шермана С.И. (2010 г.) [135], в различные периоды на описываемой территории наблюдалась выборочная активизация разломов, которая увязывается с пространственной направленностью и временной последовательностью сейсмических процессов.

Глубокозалегающее скарновое полиметаллическое месторождение Николаевское входит также в состав Кавалеровско-Дальнегорского рудного узла, который вот уже длительное время изучается геологами и геофизиками всей страны [103, 110].

При изучении современной структуры верхней части земной коры Сихотэ-Алиня и окружающих территорий ряд исследователей отмечает существенный вклад складчато-надвиговых дислокаций. Морфоструктурная схема Кавалеровско-Дальнегорского рудного узла, по материалам радарного зондирования Земли, представлена на рисунок 2.1.3.



Рисунок 2.1.3 – Морфоструктурная схема Кавалеровско-Дальнегорского рудного узла, составленная на основе матрицы высот srtm03 - по Усикову В. И. [92]

1 — фронты надвигов; 2 — тыльные крошки висячих крыльев обращенных надвигов; 3 — линии отрыва висячих крыльев обращенных надвигов; 4 — тектонические нарушения различной кинематики; 5 – дугообразный разлом, сыгравший роль триггера геодинамического события; 6 – площадь Кавалеровско-Дальнегорского рудного узла; 7 – месторождения: Н – Николаевское; Ю – Южное; 8 – эпицентр землетрясения 25.03.2016.

Анализ схемы позволил установить отчетливую связь (по дугообразному разлому) между Николаевским месторождением и расположенным в 30 км к юго-востоку эпицентром землетрясения магнитудой 4 балла 25 марта 2016 г., сыгравшего роль триггера, и совпавшего по времени с разрушительным геодинамическим явлением, зарегистрированным системой «Prognoz-ADS» на глубоких горизонтах Николаевского рудника [8, 92, 145].

Месторождение характеризуется сложным геологическим строением и приуроченностью к тектонически активным районам земной коры и в 1979 году с горизонта –120 м и ниже было отнесено к категории опасных по горным ударам.

Рудник «Николаевский» размещается в Дальнегорском рудном поле, приуроченном к южной части Восточного Вулканического пояса. Залежи сложены перекрытыми с резким угловым несогласием вулканитами верхнего мела и палеогена, сильно дислоцированными осадочными породами триаса и средней юры. Породы, слагающие месторождение, представлены туфобрекчиями, песчаниками, андезитами, алевролитами, туфами риолитов, известняками.

По прочностным и деформационным характеристикам весь комплекс руд и вмещающих пород склонен к накоплению потенциальной энергии и хрупкому разрушению в динамической форме.

Вертикальный размах оруденения находится на абсолютных отметках от минус 120 м до минус 1200 м (рисунок 2.1.4).

Отдельно стоит отметить примечательную особенность Николаевского месторождения. Рудные тела и вмещающие породы образуют здесь своеобразный чехол, располагающийся на верхних горизонтах вокруг контакта крупной пластины известняков, а на нижних – вдоль шлейфа глыбы известняков. По данным разведки, чехол прослеживается до глубины 1500 м, где он вместе с ребром пластины известняков круто погружается в северо-восточном направлении (рисунок 2.1.4).

По отношению к крупной пластине известняков рудные тела ведут себя по-разному. Если на верхних горизонтах они пересекают пластину известняков и переходят на её висячий бок, а затем достигают тело известняков в вулканогенно-осадочных породах, то на глубине рудные тела используют преимущественно лежащий бок пластины (рисунок 2.1.4).

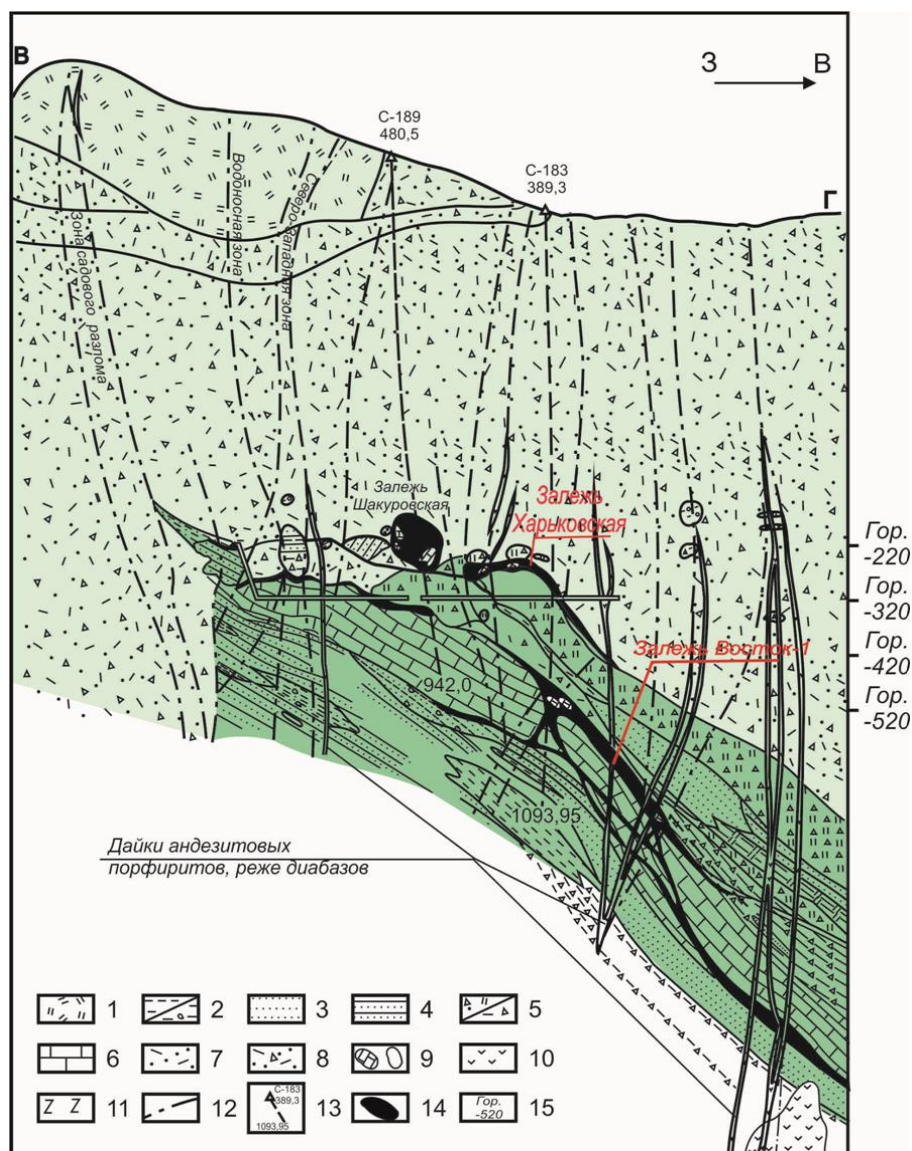


Рисунок 2.1.4 – Геологический разрез Николаевского месторождения

1 – кремнистые сланцы; 2 – аргиллиты, алевролиты; 3 – песчаники; 4 – песчаники, переслаивающиеся с алевролитами; 5 – кремнистые брекчии; 6 – известняки; 7 – липаритовые порфиры; 8 – туфы липаритовых порфиров; 9 – глыбы известняков; 10 – андезитовые порфиры; 11 – диабазы; 12 – тектонические нарушения; 13 – скважины, их номер, отметка устья и глубина до забоя; 14 – рудные залежи; 15 – изученный интервал шахтного поля

В результате проведения разведочных работ на месторождении было выделено шесть рудных залежей, содержащих промышленные запасы. Это основная по объему рудная залежь «Восток-1», остальные пять рудных тел – залежи: Марьевская, Сафроновская, Шокуровская, Жерловая и Харьковская примыкают к рудной залежи «Восток-1» со стороны кровли и выделяются под общим названием «глыбовое оруденение». В последние годы горные работы на Николаевском месторождении ведутся на рудной залежи Восток-1 и в районе рудной залежи Харьковская (рис 2.1.4).

Рудная залежь «Восток-1» расположена на глубинах 700–1300 м от дневной поверхности, в северо-восточной части Николаевского месторождения ниже отметки –1000 м не оконтурена, имеет наибольшие размеры, сложную пластообразную форму. На стадии детальной разведки залежь разведана в ее юго-западной и центральной части до отметок –406 м и –560 м буровыми скважинами в профилях от II-II до XV-XV. Разведочными работами залежь прослежена по простиранию на 1400 м при ширине от 400–500 м в западной и центральной части до 150–200 м в северо-восточной части.

Рудная залежь согласно с подошвой вулканитов погружается в северо-восточном направлении и располагается между абсолютными отметками –215...–540 м, причем, в интервале отметок от –215 м и до –350 м она имеет пологое погружение (10–15°), и далее она меняет угол погружения до 40–50°.

Рудная залежь «Восток-1» характеризуется сложной морфологией с разрывами и пережимами, наличием незамещенных известняков внутри рудных скарнов, сложной конфигурацией в плане и изменчивыми элементами залегания как по простиранию рудоконтролирующих известняков, так и в поперечных разрезах. Морфологическая изменчивость рудной залежи предопределяется ее приуроченностью к сложной неровной поверхности погребенного под вулканиты древнего известнякового фундамента эрозионного происхождения. Мощность рудного тела варьируется от нескольких метров до 81,9 м, средняя – 13,8 м.

Залежь сложена геденбергитовыми скарнами с вкрапленной и прожилково-гнездовой сульфидной минерализацией. Другие нерудные минералы представлены кварцем, кальцитом, хлоритом, серицитом, эпидотом, которые в виде осветленных зон частично замещают рудные скарны.

Выше гор. –320 м рудная залежь «Восток-1» отработана. Горно-подготовительные и очистные работы ведутся в этаже –320...–420 м.

Залежь «Харьковская» находится в центральной и восточной частях Николаевского месторождения и располагается в абсолютных отметках от –240 до –500 м. Залежь образована путем замещения сближенных глыб и обломков известняков, имеющих площадное распространение.

В морфологическом отношении залежь представляет собой пластообразное тело сложной конфигурации, наклоненное на северо-запад под углами 25–30 град.

В южной части она выполаживается и образует свод с падением крыльев на север и юг под пологими углами 5–15 град. Мощность залежи колеблется от 10,4 до 20,3 м и в среднем составляет 12,9 м.

Залежь «Харьковская» сложена геденбергит-сульфидными рудами бедного и среднего качества. Богатые массивные руды встречаются в небольших количествах. Залежь характеризуется наличием внутри рудного контура значительных по размерам участков незамещенных известняков, которые в некоторых блоках составляют 15–20 % общего объема рудной массы. Вмещающими для рудной залежи со стороны лежащего и висячего бока являются туфы липаритов, с которыми она имеет четкие, неровные контакты. В лежащем боку геденбергит-сульфидные руды на отдельных участках контактируют с кремнистыми и кремнисто-полимиктовыми брекчиями.

Месторождение Николаевское характеризуется высокими параметрами поля природных напряжений, выраженным блочным строением массива, способностью к динамическому разрушению горных пород и, в настоящее время, – большими площадями и объемами отработанных пространств – около 4 млн. м³ (рисунок 2.1.5).

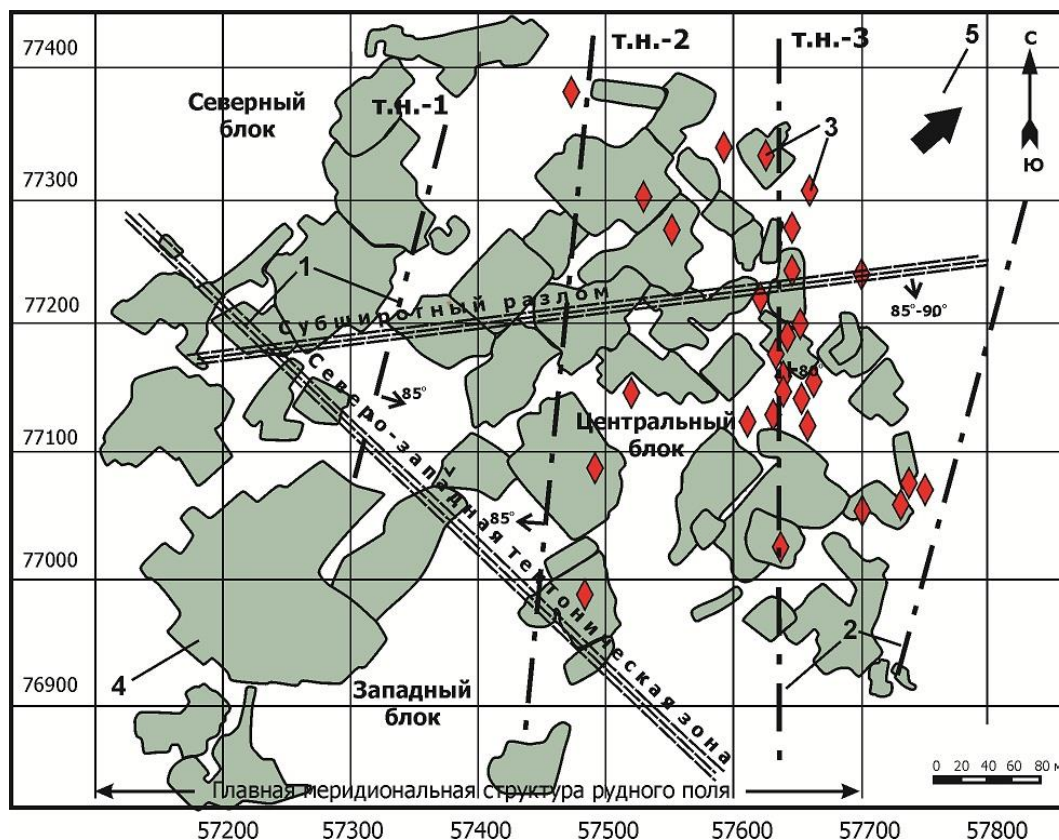


Рисунок 2.1.5 – Структурно-блоковая схема Николаевского месторождения

Площадь шахтного поля характеризуется сильной тектонической нарушенностью. Основные нарушения имеют меридиональные и субмеридиональные направления, подчиненное значение имеют нарушения широтного и субширотного направлений, которые рассматриваются как основные системы нарушений (рисунок 2.1.5).

По результатам геодинамического районирования установлено, что площадь месторождения имеет выраженное блоковое строение [95]. Шахтное поле разбито на 3 структурных блока (северный, центральный и западный) крутопадающими субширотным разломом (85–90 град на юго-восток) и Северо-Западной тектонической зоной (почти вертикальной), отнесенной к структурам первого порядка, а также крутопадающими пострудными тектоническими нарушениями (рисунок 2.1.5). Выраженное блоковое строение поля месторождения определяется также протяженными крутопадающими разрывными нарушениями субмеридионального простирания (угол падения 70–85 град), дайковыми телами северо-западного направления и пологими нарушениями.

Отдельные структурные блоки под воздействием природных и техногенных полей напряжений способны смещаться в подработанном массиве в сторону отработанных пространств, создавая при этом высокие динамические нагрузки в массиве, приводящие к проявлениям горного давления в динамической форме.

На Николаевском месторождении было испытано несколько технологических схем разработки. Первоначально месторождение разрабатывалось с применением камерно-целиковой системы разработки с твердеющей закладкой. Часть рудных тел месторождения отработана камерной системой разработки с твердеющей закладкой с двухстадийной очистной выемкой. На ряде участков отработаны и заложены твердеющей закладкой только первичные камеры, а вторичные камеры после отработки частично заложены сухой породой; часть пустот оставлена незаложенной и погашена путем изоляции. Северо-западная часть шахтного поля (рудная залежь «Восток-1») была отработана системой подэтажного обрушения без закладки отработанного пространства с последующим его погашением путем изоляции.

В последние годы был получен положительный опыт применения камерной системы разработки с управляемым обрушением кровли. Рудную залежь

разбивают на блоки, содержащие камеру и целик, и осуществляют выпуск руды под защитой породной консоли. Завершив выемку запасов, производят принудительное обрушение пород кровли до проектной высоты и приступают к отработке готового к выемке смежного блока.

Постоянное увеличение глубины ведения горных работ и растущий объём выработанных пространств с отсутствием твердеющей закладки обуславливает активизацию геодинамических процессов. С 2011 года на Николаевском месторождении зарегистрировано более 250 случаев динамических проявлений горного давления в различных формах: от стреляний и вывалов до собственно горных и горно-тектонических ударов. Наибольшее количество толчков регистрировалось в 2011, 2012, 2019 и 2020 годах. Всего за период с 2011 по 2020 гг. на месторождении зарегистрировано 53 толчка.

Таким образом, структурно-геологические и горнотехнические условия разработки Николаевского месторождения имеют ряд особенностей, обусловленных сложным структурно-геологическим строением массива горных пород и определяющих регистрируемые в последние годы проявления удароопасности и техногенной сейсмичности. Выявленные геолого-структурные особенности требуют более детального изучения и являются важными факторами, которые необходимо учитывать при оценке геомеханической ситуации и планировании горных работ на глубоких горизонтах.

2.2 Изучение геомеханического состояния массива горных пород на глубоких горизонтах рудника по данным сейсмоакустического контроля

В последние годы на Николаевском месторождении для оценки и контроля удароопасности применяется комплекс методов: сейсмоакустический с применением автоматизированной системы контроля горного давления (АСКГД) «Prognoz-ADS» и прибора локального контроля «Prognoz-L»; геомеханический метод, основанный на эффекте дискования керна; визуальные наблюдения за динамическими проявлениями горного давления в горных выработках [51, 88, 96, 98, 99, 101, 126]. На отдельных участках рудничного поля выполнялись

эксперименты по оценке состояния массива деформационным методом с применением струнных и волоконно-оптических деформометров.

За период с 2011 по 2020 гг. на месторождении зарегистрировано 80276 сейсмоакустических событий. Помесячная динамика распределения числа САЭ-событий с 2011 г. по настоящее время представлена на рисунок 2.2.1, свидетельствуя о значительном увеличении сейсмоакустической активности с 2018 г.

В настоящее время региональный прогноз удароопасности осуществляется с применением АСКГД «Prognoz-ADS» на следующих участках рудничного поля:

1. Район Блока Нижний;
2. Район Опытно-промышленного блока (ОПБ);
3. Район Блоков Южный 1, 2 и 3;
4. Блок Север 8;
5. Район Блоков 40 и 45;
6. Район Блока Северный фланг;
7. Район Очистных блоков рудной залежи Харьковская (камера 3, 4 блок 7 и другие).

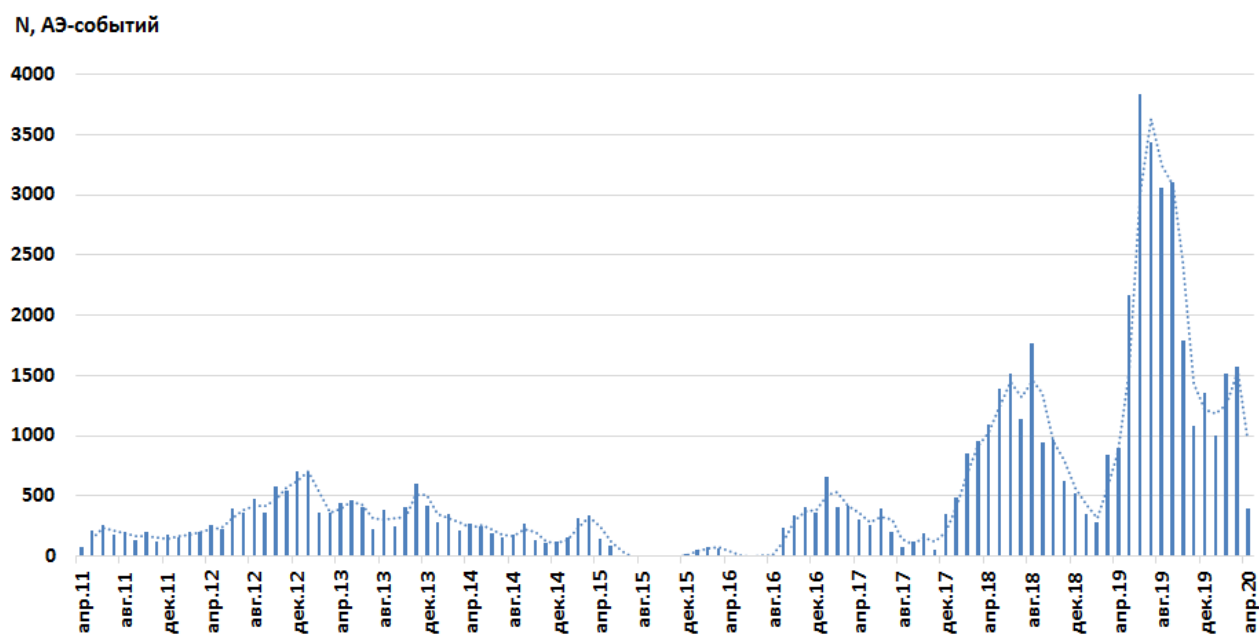


Рисунок 2.2.1 – Распределение числа АЭ-событий, зарегистрированных на Николаевском месторождении в 2011–2020 гг.

Для выявления закономерностей изменения геомеханической ситуации и проявления сейсмоакустической активности на Николаевском руднике в период с 2011 по 2020 гг. был проведён ретроспективный сопоставительный анализ. Анализировали параметры регистрируемых сейсмоакустических событий, крупные динамические проявления горного давления, объёмы отработки запасов и некоторые другие факторы.

За период с апреля 2011 г. по май 2015 г. на месторождении зарегистрировано 15506 АЭ-событий [81, 93, 98, 100]. С использованием методики выделения связанных АЭ-событий за этот период было выявлено две крупные акустически-активные зоны (ААЗ) вдоль тектонически активного нарушения ТН-3 (рисунок 2.2.2).

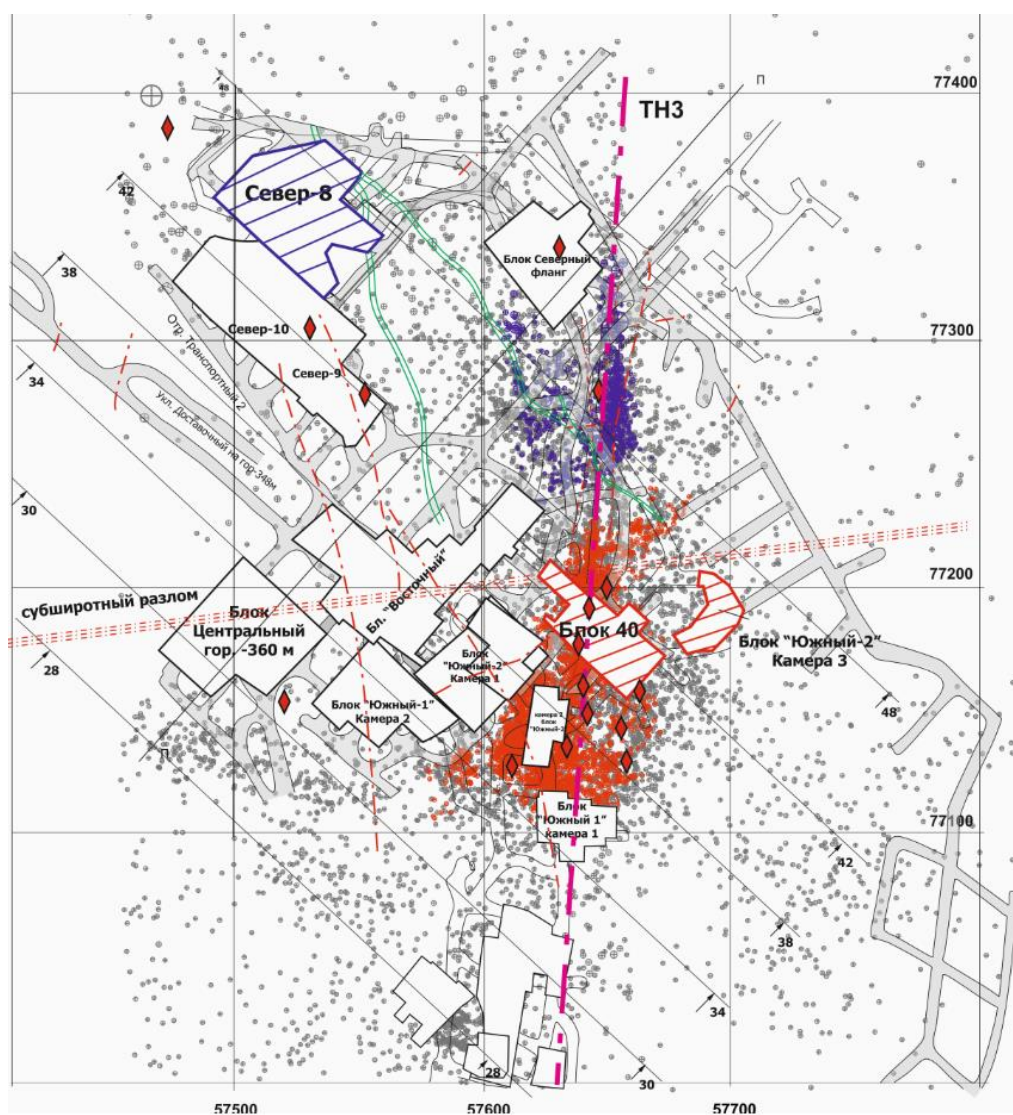


Рисунок 2.2.2 – Карта акустической активности за период с апреля 2011 г. по май 2015 г. в проекции на совмещенный план горизонтов

Наибольшее число событий зарегистрировано в зоне, расположенной в окрестностях камер 1, 2 блока Южный-1 и камер 1, 2, 3 блока Южный-2 (красная зона на рисунке 2.2.2). Здесь было зарегистрировано 5427 АЭ-событий с суммарной энергией 1589,7 кДж.

Изменение акустической активности может объясняться образованием высоконапряженной зоны в целике между обрабатываемой камерой 3 блока Южный-2 и тектоническим нарушением ТН-3 (рисунок 2.2.2). Данная зона приурочена к узкой щели в кровле крупной пластины известняков, имеет тектоническую природу и простирается ниже гор. –420 м [87].

В период с 09.04.2011 г. по 18.05.2015 г. наблюдается увеличение акустической активности, которая сопровождает процесс отработки «камеры 3 Блока Южный-2» с апреля 2011 г. по декабрь 2012 г. (рисунок 2.2.3).

Акустическая активность в междукamerном целике к концу отработки камеры 3 блока Южный-2 возросла более чем в 8 раз (рисунок 2.2.3) по сравнению с уровнем конца 2011 г.–начала 2012 г. (в среднем от 15–50 до 400 событий в январе 2013 г.).

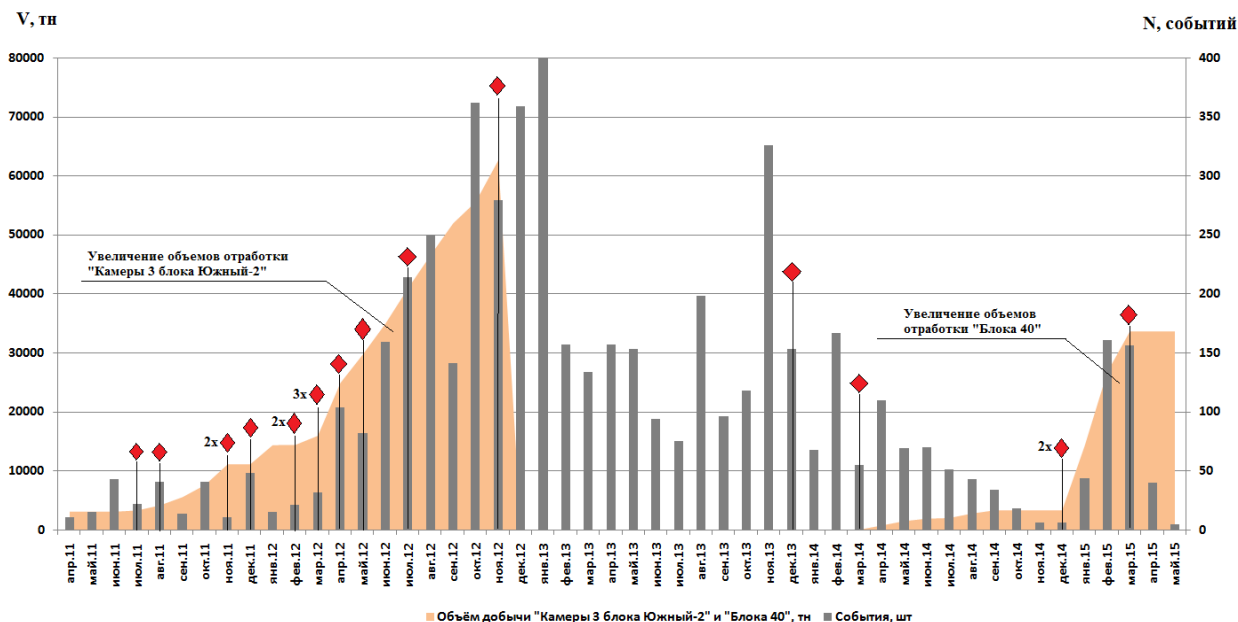


Рисунок 2.2.3 – Помесячное распределение числа АЭ-событий в ААЗ (красного цвета, рисунок 2.2.2) и толчков, зарегистрированных на Николаевском месторождении за период с апреля 2011 г. по май 2015 г.

За период отработки камеры 3 блока Южный-2 с ноября 2011 г. по ноябрь 2012 г. зарегистрировано 11 крупных динамических проявлений горного давления,

наибольшая часть из которых лоцируется вдоль тектонически активного нарушения ТН-3 в окрестностях камер блока Южный-1 и Южный-2 (рисунок 2.2.2).

После отработки камеры 3 блока Южный-2 наблюдалось плавное снижение акустической активности в этой зоне вплоть до декабря 2014 года, когда началась отработка Блока 40 (рисунок 2.2.3). Изменение акустической активности при отработке блока 40 объясняется подработкой целика между камерами блоков Южный-1 и Южный-2, пересеченного тектонически активным нарушением ТН-3 (рисунок 2.2.2).

В пределах второй крупной ААЗ, расположенной ближе к северной части рудничного поля (синяя зона на рисунке 2.2.2), было зарегистрировано 855 АЭ-событий с суммарной энергией 364,16 кДж. Период ее активности – с 19.12.2011 г. по 02.05.2014 г.

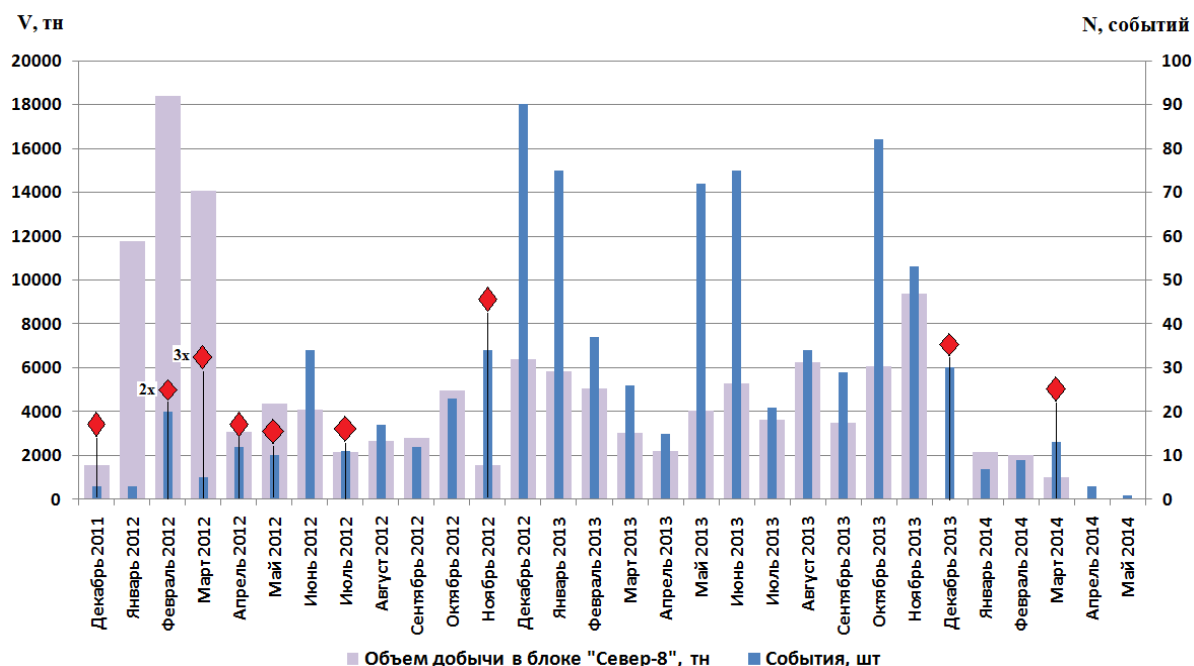


Рисунок 2.2.4 – Помесячное распределение числа АЭ-событий в ААЗ (синего цвета, рисунок 2.2.2) и толчков, зарегистрированных на Николаевском месторождении за период с апреля 2011 г. по май 2015 г.

В этой зоне наблюдалось увеличение акустической активности, связанное с отработкой камеры Север-8 с декабря 2011 г. по март 2014 г. (рисунок 2.2.4). Спад акустической активности в этой зоне в начале 2014 г. совпадает с приостановлением работ в блоке Север-8. Примечательно, что активизация данной зоны произошла при повышенных объёмах добычи в блоке Север-8. В январе-

марте 2012 г. месячный объём добычных работ составлял от 4 до 6 тыс. м³ (рисунок 2.2.4).

Высокая интенсивность добычных работ спровоцировала ряд крупных динамических проявлений (8 толчков) с февраля 2012 г. (рисунок 2.2.2, 2.2.4).

Именно здесь в северной части рудничного поля 10 и 14 февраля 2012 г. произошло два толчка на отметках –404,6 м и –408,2 м, сопровождавшихся сотрясением массива, пылеобразованием и сейсмическими колебаниями. Энергия первого, наиболее крупного, толчка, зарегистрированного в районе блока Север-8, составила $10,6 \cdot 10^4$ Дж. Этот участок массива приурочен к местам интенсивного ведения горных работ в зоне взаимовлияния геодинамически активных тектонических нарушений (тектонического нарушения ТН-3 и сопряженных дайковых тел) и обширных выработанных пространств. В 2008 г. в данной зоне было зафиксировано 4 мощных динамических проявления, приуроченных к глыбе известняков в форме клина, отрезанной по двум граням дайковыми телами.

С 22 мая 2015 г. по декабрь 2016 г. в связи с подтоплением уклона Бурового было проведено временное отключение датчиков первой линии, в связи с чем эффективность сейсмоакустического контроля в этот период была ниже нормативной.

Вместе с тем, геомеханическая ситуация, начиная с октября 2015 г., на руднике «Николаевский» значительно усложнилась. Всего здесь за IV кв. 2015 г. зарегистрировано 25 динамических проявлений горного давления, включая серию разрушительных толчков в период с 05.10.2015 по 07.10.2015. Анализ пространственного распределения очагов геодинамических явлений показал, что последние в основном приурочены к активным разломам, участкам массива, сложенным высокопрочными и хрупкими породами, границам тектонических блоков и элементам геологической структуры (дайковым телам, контактам литологических разностей и др.).

Установлено, что проявления техногенной сейсмичности, зарегистрированной в период с 5 по 8 октября 2015 г. и серия сильных толчков на глубоких горизонтах Николаевского полиметаллического, вызваны активизацией геодинамических процессов вдоль границ подработанного горными работами тектонического блока треугольной формы объемом более 5 млн м³ [92]. Анализ

закономерностей изменения параметров сейсмоакустической активности в районе эпицентра наиболее крупного геодинамического события создали условия для понимания механизма геомеханических процессов во время проявления техногенной сейсмичности и в последующий период.

Геомеханическая обстановка на Николаевском руднике продолжала оставаться сложной и в 2016 г. Так, 25 марта 2016 г. в 00 ч. 57 мин. в районе рудной залежи Восток-1 (блок 40) зарегистрировано сильное динамическое явление, которое сопровождалось мощным звуковым проявлением, сотрясением всего шахтного поля и сейсмическими колебаниями, отмеченными в поверхностном комплексе рудника [92]. В результате этого явления разрушены крепь и контур горных выработок на горизонтах –375, –390, –406, –420 м. Объем разрушенной горной породы превысил 400 м³. В первые часы после динамического явления акустическая активность массива горных пород более чем на два порядка превышала средний уровень. Как уже было отмечено, описываемое явление совпало по времени с землетрясением магнитудой 4 балла в пос. Каменка на побережье Японского моря. Описываемое событие может квалифицироваться как геодинамическое, поскольку привело к образованию в массиве горных пород открытых разрывов и трещин (рисунок 1.2.1), протяженностью десятки метров. По границам разрывов наблюдались поднятия почвы на 10–12 см, а сами разрывы пространственно совпадают с элементами тектонической структуры месторождения [83].

Еще одно крупное геодинамическое событие произошло 6 апреля 2016 г. в 06 ч. 47 мин. на гор. –420 м в штреке № 1, пройденном по контакту мраморизованных известняков и геденбергит-сульфидных скарнов в узле пересечения субмеридионального тектонического нарушения ТН-3 с северо-восточной и субширотной зонами интенсивной трещиноватости. Эпицентр события находился под днищем блока 40 рудной зоны Восток-1 и сопровождался сильным звуковым эффектом, сотрясением массива по всему шахтному полю, запылением выработок. В результате горного удара из левого борта и кровли штрека было выброшено более 10 м³ породы, частично разрушены выработки на подэтажах гор. –375, –390, –406 м [83].

Таким образом, были получены новые экспериментальные данные о процессах подготовки и механизме крупных геодинамических явлений в массиве Николаевского полиметаллического месторождения, сопровождавшихся многочисленными разрушениями горных выработок и сейсмическими событиями, а также смещениями участков пород. Установлена взаимосвязь геодинамической активизации участка залежи с особенностями природно-технической геодинамической системы месторождения, характеризующейся сложной тектонической структурой и наличием большого объема выработанных пространств и поэтому – особыми закономерностями формирования техногенного поля напряжений в разрабатываемом массиве горных пород.

В сентябре 2016 г. в связи с ликвидацией последствий затопления уклона Бурового было проведено подключение датчиков по всем линиям с полным восстановлением работы системы «Prognoz-ADS» (рисунки 2.2.1 и 2.2.5).

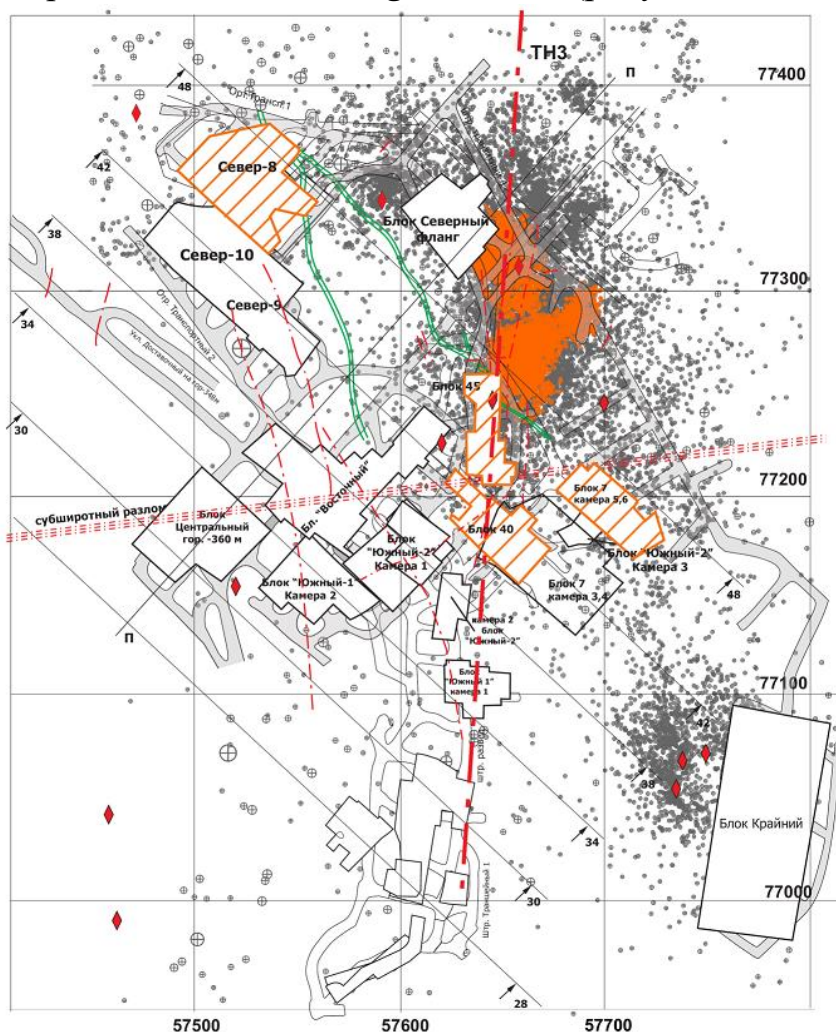


Рисунок 2.2.5 – Карта акустической активности за период с сентября 2016 г. по декабрь 2018 г. в проекции на совмещенный план горизонтов

За период с сентября 2016 г. по ноябрь 2017 г. в зоне контроля зарегистрировано 4354 АЭ-событий, наибольшая часть из которых лоцируется вдоль тектонически активного нарушения ТН-3 в пространстве между блоками Север-8 и Северный фланг на северном фланге месторождения и Блоком 40 и камерой 6 блока 7 на южном фланге месторождения рудной залежи Восток-1 и Харьковская (рисунок 2.2.5).

В период с августа 2016 г. по ноябрь 2017 г. (так же, как и в 2012–2013 гг.) наблюдалось увеличение акустической активности, сопровождавшей процесс отработки камеры «Север-8» (рисунок 2.2.6). В этот же период на руднике зарегистрировано значительное число динамических проявлений горного давления в различных формах, включая 3 крупных геодинимических явления 10, 25 и 27 ноября 2016 г. (рисунок 2.2.6).

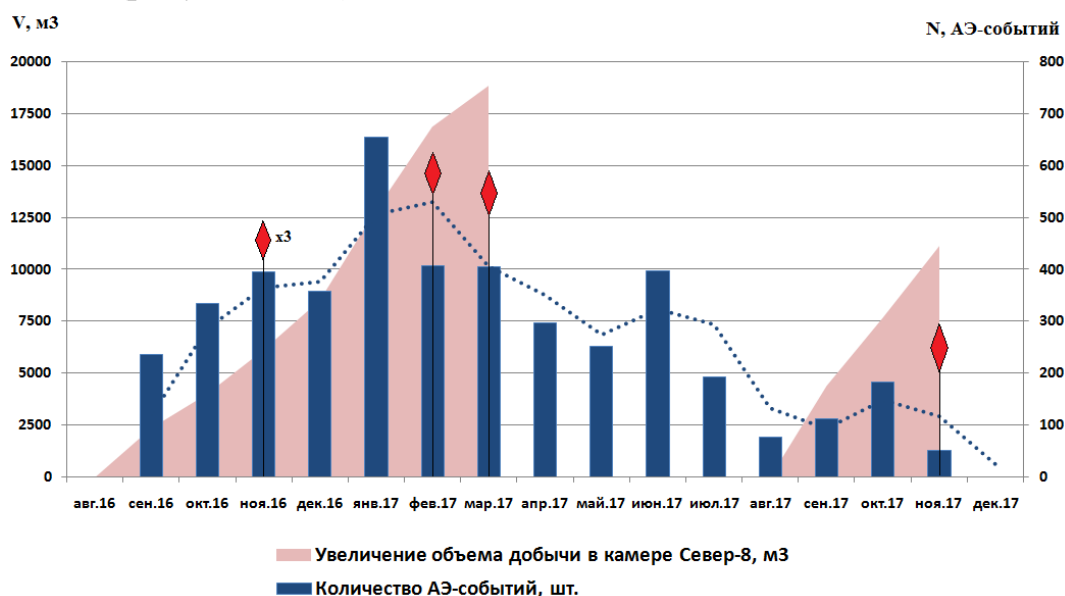


Рисунок 2.2.6 – Помесячное распределение числа АЭ-событий и толчков, зарегистрированных на Николаевском месторождении за период с сентября 2016 г. по ноябрь 2017 г. в сопоставлении с объёмами добычи руды при отработке камеры Север-8

10 ноября 2016 г в 16:23 зарегистрирован толчок в глубине массива с энергией 11142 Дж. Событие сопровождалось мощным звуковым эффектом, сотрясением массива и было отмечено работниками рудника по всему шахтному полю от гор. –420 м до гор. –220 м, а также в поверхностном комплексе. Горные работы были приостановлены, люди выведены на поверхность. В течение суток осуществлялся отстой массива и горных выработок. Данный участок относится к к

узлу пересечения разломов и зон повышенной трещиноватости различных направлений, включая: 1) разлом Дайковый северо-западного (360°) направления; 2) субмеридиональную зону Андезитовую (разлом ТН-3); 3) субширотную зону повышенной трещиноватости.

В конце ноября 2016 г. также наблюдались проявления техногенной сейсмичности, включая толчок в глубине массива с энергией 9325 Дж, зарегистрированный 25 ноября 2016 г. в 11:32.

Через два дня 27 ноября 2016 в 08:30 был отмечен ещё один толчок с энергией 3220 Дж в глубине массива в отметке $Z = -571$ м, также сопровождавшийся сильным звуковым эффектом и сотрясением массива. Установлено, что эпицентры толчков располагаются на значительном расстоянии от района ведения горных работ, но находятся на фланге и на глубоких горизонтах зоны тектонически активного разлома ТН-3.

В январе–марте 2017 г. на Николаевском руднике горные работы велись на р.з. Харьковская в блоке 7, камера 6 на гор. -348 м (проходка). АСКГД в этом районе было зафиксировано 2 толчка 20.02.17 и 02.03.17 с энергией, соответственно, 1951 и 735 Дж (рисунки 2.2.5, 2.2.6).

31 октября 2017 г. в 22:27 взрывные работы на гор. -307 м в штреке Подэтажный-1 спровоцировали 4 мощных события вдоль ТН-3 на гор. -406 м с энергией от 1,39 до 3,99 кДж. В очаговой зоне, расположенной в районе камеры Северный фланг, в этот период наблюдалось повышение значений показателя $K_{уд}$ до критического уровня, что свидетельствует о потенциальной удароопасности данного участка массива. Именно на данном участке позднее (01.11.2017 г.) зарегистрирована серия сильных толчков с энергией от 1,39 до 3,99 кДж (рисунок 2.2.6).

В сентябре–октябре 2017 г. была произведена модернизация системы «Prognoz-ADS» на Николаевском месторождении за счет установки дополнительных геофонов на гор. -323 м, -348 м, -360 м, -390 м, -406 м, -420 м.

За счет расширения зоны контроля на Северном фланге с декабря 2017 г. по декабрь 2018 г. регистрировалось в среднем в 3 раза больше АЭ-событий, чем за предыдущий период.

За период с декабря 2017 г. по декабрь 2018 г. в зоне контроля зарегистрирована крупная ААЗ, наибольшая часть АЭ-событий которой концентрировалась вдоль тектонически активного нарушения ТН-3 в пространстве между блоками Север-8 на северном фланге и Блоком 45 и камерой 6 блока 7 на южном фланге рудной залежи Восток-1 и Харьковская (рисунок 2.2.5).

Резкое увеличение акустической активности в данном районе объясняется образованием высоконапряженной зоны в целике между отрабатываемой камерой 7 блока 6 и блоком 45 в области влияния тектонического нарушения ТН-3. В июне 2018 г. в глубине массива под блоком 45 и в кровле камеры 6 блока 7 вдоль тектонически активного нарушения ТН-3 было зарегистрировано два толчка (рисунок 2.2.6). В июле был зарегистрирован ещё один толчок на пересечении тектонически активного разлома ТН-3 с блоком Северный фланг.

Наиболее тесная связь увеличения акустической активности и интенсивности добычных работ наблюдалась в процессе отработки камеры 6 блока 7. После приостановления добычных работ в камере 6 блока 7 произошло плавное снижение акустической активности в этой зоне в ноябре и декабре 2018 г. (рисунок 2.2.7).

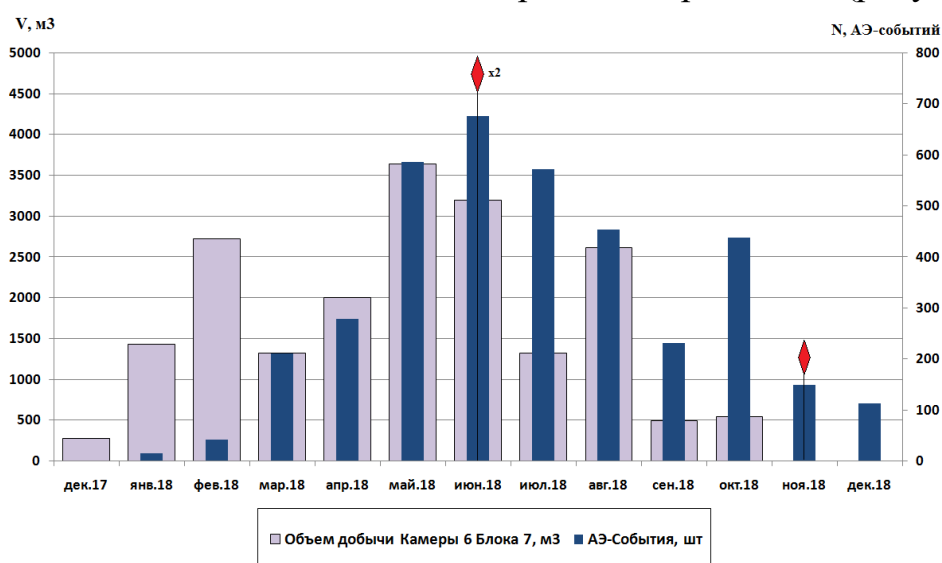


Рисунок 2.2.7 – Помесячное распределение числа АЭ-событий и толчков, зарегистрированных на Николаевском месторождении за период с декабря 2017 г. по декабрь 2018 г. в сопоставлении с объёмами добычи руды при отработке Камеры 6 Блока 7

Целая серия проявлений техногенной сейсмичности зарегистрирована в ноябре 2018 г., включая наиболее крупное событие в районе блока ОПБ с энергией

$19,4 \cdot 10^4$ Дж. Через несколько дней после геодинамических явлений произошло снижение сейсмоакустической активности.

В первом квартале 2019 года в целом на месторождении уровень сейсмоакустической активности был невысоким, но, начиная с марта, он начал расти и стали регистрироваться сильные динамические проявления горного давления. Так, в период отработки блока Север-8 на гор. –420 м было зарегистрировано 4 толчка [90].

Первый толчок был зарегистрирован 25 марта в 18:53 в массиве известняка с системой трещин северо-западного, северо-восточного и широтного направлений с сильным сотрясательным эффектом в районе блока ОПБ на гор. –433 м. Ещё 3 толчка было зарегистрировано 28 марта в 07:22 после проведения взрывных работ. Первый из них был зарегистрирован с энергией 1706 Дж в блоке Север-8 в отм. –409 м. В течение последующих двух минут было зарегистрировано ещё два толчка на большей глубине (в отм. –491 м и –515 м). Впоследствии в период II–III кварталов при отработке блока 45 также наблюдалось повышение сейсмоакустической активности.

С 9 июня наблюдался резкий рост акустической активности на гор. –406 м в районе штофа Транспортный 45-2 в непосредственной близости от тектонически активного разлома ТН-3 [90]. Рост активности совпал с переходом отработки камеры 2 блока 45 на гор. –406 м.

За период наблюдений с 15.06.2019 по 26.06.2019 системой геомеханического мониторинга «Prognoz-ADS» в данном районе была зафиксирована одна из крупнейших акустических зон. Суммарно здесь было зарегистрировано 850 АЭ-событий с энергией 19395 Дж (на рисунке 2.2.8 зона выделена красным цветом).

1 июля 2019 г. в 09:20 на руднике в глубине массива между южным и северным флангом рудной залежи «Восток-1» произошел ещё один толчок, сопровождавшийся звуковым эффектом, сотрясением массива и запылением выработок. С этого периода наблюдалась новая активизация акустически активной зоны на гор. –406 м в районе отработки камеры 2 блока 45. Впоследствии периоды спадов и подъемов сейсмоакустической активности наблюдались в течение 3 месяцев отработки камеры 2 блока 45.

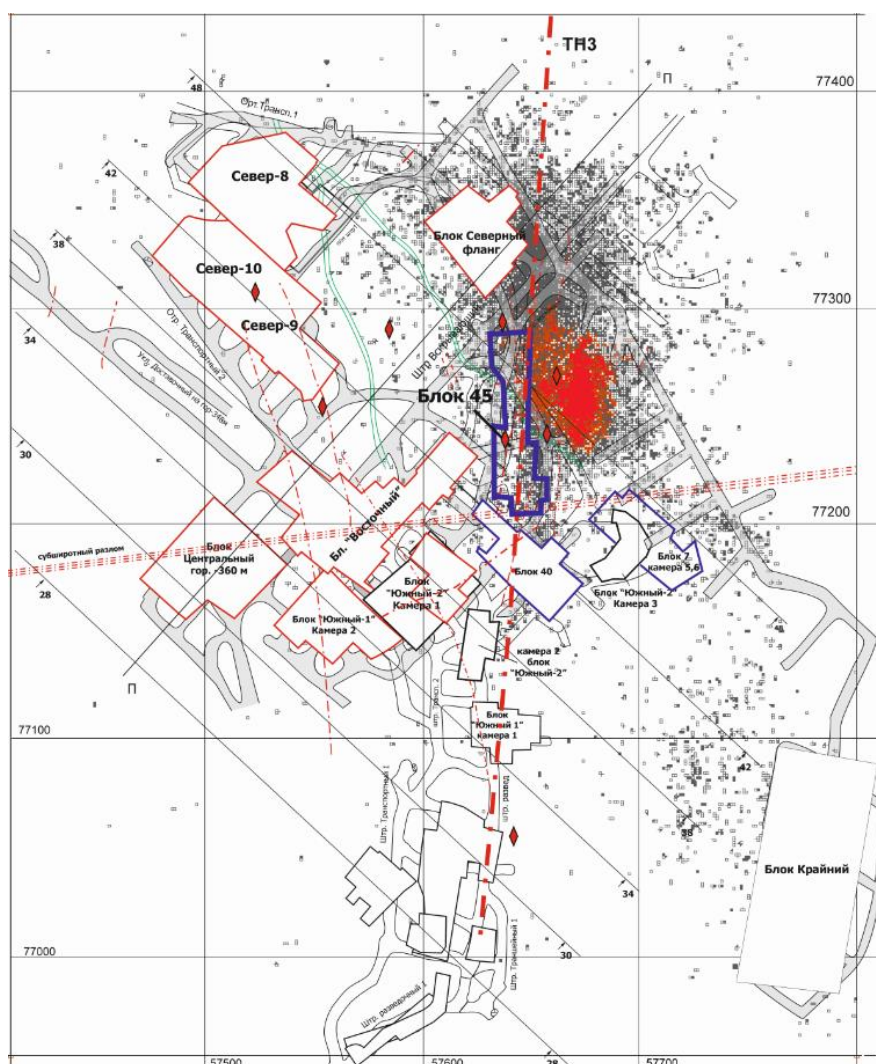


Рисунок 2.2.8 – Карта акустической активности за период с января 2019 г. по апрель 2020 г. в проекции на совмещенный план горизонтов

15 августа системой «Prognoz-ADS» на гор. –420 м после проведения взрывных работ на подэтаже –406 м (камера 2 блока 45) зарегистрирован крупный толчок с энергией 10885 Дж. Участок рудной залежи в районе регистрации толчка расположен в пределах отработки блока 45 и представлен вмещающими породами – мраморизованными известняками и туфами. Геодинамическая обстановка данного района осложнена пересечением тектонического нарушения ТН-3 и крутопадающих дайковых разломов.

В октябре 2019 г. на Николаевском месторождении наблюдалось резкое ухудшение геомеханической обстановки. Зарегистрировано 2 крупных толчка с энергией, соответственно, 4569 и 39137 Дж.

Первое геодинамическое событие зарегистрировано 10 октября в 11:34 в массиве горных пород в районе блока 45 камеры 2. Толчок сопровождался сильным

звуковым эффектом, сотрясением, обрушением по бортам и кровле выработки в районе сопряжения штреков Транзитный-7 и Транзитный 7-1.

16 октября в 12:01 зарегистрировано ещё одно крупное геодинамическое событие в массиве в зоне влияния опорного давления отработанных камер 1 и 2 блока 45 на глубине –491 м. Эпицентр проявления расположен на контакте руды с массивом известняков вблизи активного тектонического нарушения ТН-3. Динамическое проявление сопровождалось сотрясением массива от гор. –290 м до –537 м и многочисленными афтершоковыми сотрясениями массива, происходящими в течение двух последующих за событием дней. Похожее геодинамическое событие было уже зарегистрировано ранее в ноябре 2018 года. Всего с 16 по 18 ноября зарегистрировано 134 афтершоковых события с суммарной энергией 81534 Дж.

Ещё одно крупное динамическое событие с энергией 11916 Дж зарегистрировано 17.11.19 в 9:11, сопровождавшееся сильным звуковым эффектом, отмеченным на гор. –446 м, –433 м до гор. –320 м на пересечениях тектонических нарушений меридионального, северо-западного и северо-восточного направлений. Толчок зарегистрирован на гор. –433 м в районе отработки камеры 1 и 2 блока ОПБ на гор. –433 м, –446 м и –460 м на пересечении с тектонически активным разломом ТН-3.

В 2020 г. на месторождении зарегистрировано 19465 сейсмоакустических событий. Наибольшая акустическая активность массива наблюдалась с января по март, а также в июне и сентябре.

В первом квартале 2020 г. на месторождении произошло 2 толчка. Первый толчок зарегистрирован 11 января 2020 г. в районе блока Нижнего в 12:20 в глубине массива на пересечении субширотного разлома и ТН-3. Энергия толчка составила 18526 Дж. Очаг геодинамического события зафиксирован на отметке –517 м. Второй толчок зарегистрирован 28 марта 2020 г. в районе уклона Буровой-1 в 14:02 в глубине массива известняков. Динамическое проявление отмечалось работниками рудника от гор. –320 м до подэтажа –446 м. Энергия толчка составила 19675 Дж. По результатам расчета координат это геодинамическое событие зафиксировано на отметке –569 м.

Во втором квартале 2020 г. на месторождении зарегистрировано ещё 3

толчка. Первый толчок – 11 апреля 2020 г. в 09:02 в глубине массива. Он сопровождался сильным звуковым эффектом, отмеченным на горизонтах –320...–446 м. Энергия толчка составила 4950 Дж. Очаг геодинамического явления находился на отметке –458 м. Второй толчок – 26 мая 2020 г. под днищем блока 45 в 01:08 в глубине массива на пересечении субширотного разлома и разлома ТН-3. Энергия толчка составила 2505 Дж. Геодинамическое событие зафиксировано на отметке –477 м. Третий толчок зарегистрирован 18 июня 2020 г. в 05:10 в пределах тектонического нарушения ТН-3 в районе опытно-промышленного блока (ОПБ) на отметке –491 м, который также сопровождался сильным звуковым эффектом и сотрясением массива в течение 40 мин после проявления. Энергия события составила 4987 Дж. Кроме этого, событие в течение более чем 2 часов сопровождалось серией афтершоков в районе узла пересечения субширотного разлома и разлома ТН-3.

В четвертом квартале 7 декабря 2020 года зарегистрирован ещё один толчок на отметке –461 м с энергией 12521 Дж в районе блока 45 на пересечении с разломом ТН-3.

Таким образом, на Николаевском месторождении, где в последние годы наблюдается значительный рост опасных геодинамических явлений, выявлены и обобщены особенности формирования природно-техногенного поля напряжений, во многом обусловленные тектонической структурой массива горных пород и сложной геометрией выработанного пространства. Наибольшее число регистрируемых АЭ-событий приурочено к сети разломов и особенно – к зоне активного крутопадающего разлома ТН-3 с сопутствующими системами трещиноватости, крутопадающих дайковых тел, преимущественно северо-западного направления.

Следует констатировать, что в сложившейся сложной геомеханической обстановке для решения задачи обоснования региональных мер управления горным давлением и снижения геодинамического риска очевидна необходимость постановки и проведения углубленных комплексных геомеханических исследований, включающих изучение геодинамической и сейсмической обстановки и НДС массивов горных пород, а также изучение закономерностей проявления геомеханических и геодинамических процессов.

2.3 Оценка влияния структурно-геологических особенностей на напряженно-деформированное состояние массива горных пород

Большое число зарегистрированных в процессе мониторинга акустически активных зон и крупных проявлений удароопасности и техногенной сейсмичности требуют сопоставления с геолого-структурными особенностями месторождения для детального понимания процессов, происходящих в горном массиве, а также для оперативного и эффективного управления горным давлением с целью повышению безопасности горных работ и снижения геодинамического риска [37, 60, 111].

Использованный для выявления влияния структурно-геологических факторов удароопасности в районе зарегистрированных акустически активных зон изученный интервал месторождения располагается между абсолютными отметками –260 м...–440 м в рудных залежах «Харьковская» и «Восток-1».

Фактический материал, полученный на этом изученном интервале при разведочном бурении и эксплуатационных работах, позволяет отразить объемную структуру Николаевского месторождения с помощью карт рельефа. Предполагалось, что морфологический анализ подобной исходной информации позволит определить специфику главных структурных особенностей разреза на различных глубинных уровнях и осуществить иерархически-морфологическое разделение контактов пород.

Для проведения исследований построены детальные карты изогипс и изопакит контуров четырёх основных типов горных пород¹, которые отражают современную глубинную архитектуру основных горизонтов Николаевского месторождения:

1. Кровля крупной пластины известняков (рисунок 2.3.2а).
2. Кровля нижних метасоматитов, ориентированная вдоль висячего бока пластины (рисунок 2.3.2б).
- 3-4. Подошва и кровля верхних метасоматитов, сформированных вдоль глыбы известняков и залегающих в вулканогенных осадочных породах (рисунок 2.3.1).

¹ Исследования выполнены совместно с главным научным сотрудником Института горного дела ДВО РАН, доктором геолого-минералогических наук Саксин Б. Г.

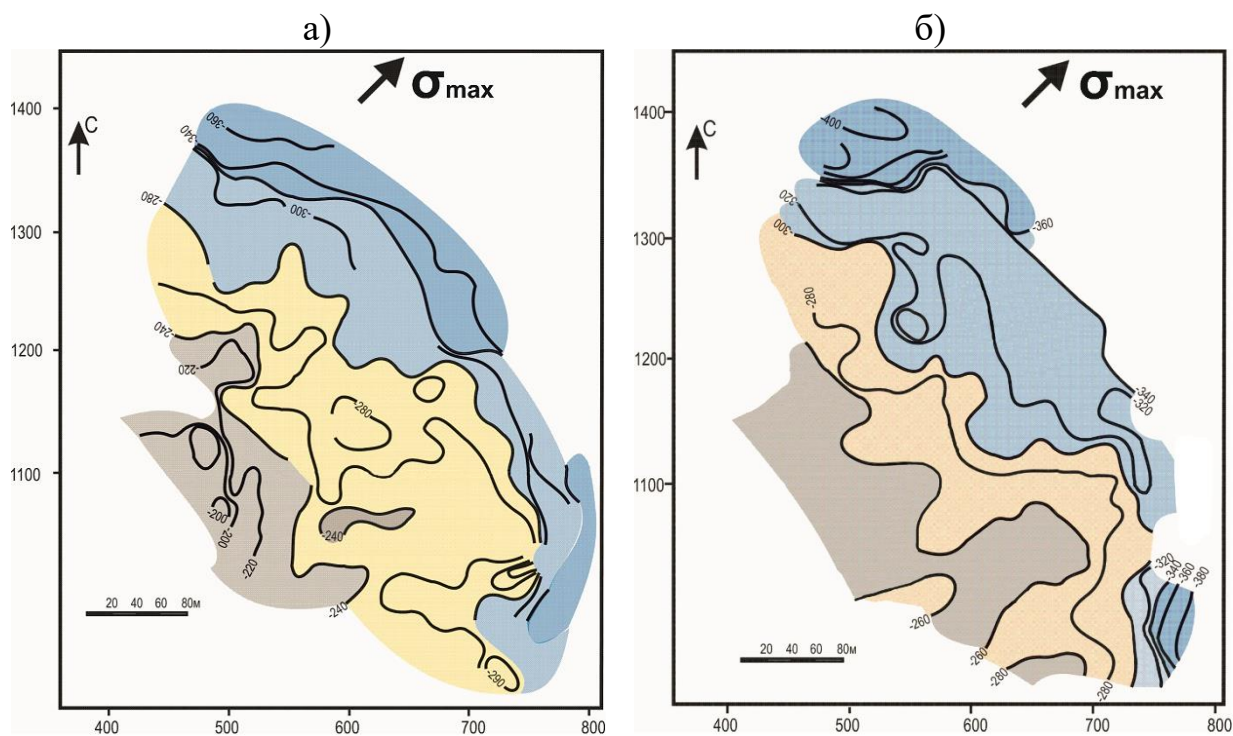


Рисунок 2.3.1 – Схематическая карта изогипс подошвы (а) и кровли верхних метасоматитов (б). Стрелками показано направление максимальных сжимающих напряжений.

Для составления карт изогипс использовалась система геологических разрезов АО «ГМК «Дальполиметалл» (с 28 по 54), определяющих участок шахтного поля размером 250×400 м, в котором в последние годы ведутся горные работы. Отметки изучаемых поверхностей раздела сняты по равномерной сетке точек 20×20 м. Морфоструктурная интерпретация результатов отображена на рисунках 2.3.1, 2.3.2.

Наиболее информативными оказались карты, отражающие морфологические особенности верхних (вмещающих рудное тело Харьковское) и нижних (вмещающих рудное тело Восток) метасоматитов, а также карта изогипс кровли олистолита известняков (рисунок 2.3.1, 2.3.2).

Схематическая карта изогипс подошвы и кровли верхних метасоматитов представлена на рисунке 2.3.1. Морфология подошвы и кровли верхних метасоматитов отличается своей строгой упорядоченностью в северо-западном направлении. При этом суммарное падение кровли верхних метасоматитов имеет отчетливое северо-восточное направление. Верхние и нижние контуры метасоматитов, образуя единое тело, соединены между собой вертикальным каналом, локализованным над субширотным валом в кровле пластины известняков.

На рисунке 2.3.2 также представлена схематическая карта изогипс кровли нижних метасоматитов и кровли олистолита крупной пластины известняков. В общих чертах морфология нижних рудосопровождающих метасоматитов совпадает с морфологией кровли контуров известняков. Крутообразное поднятие этой поверхности чётко направлено в северо-восточном направлении вдоль направления современного регионального сжатия (рисунок 2.3.2).

Геологоразведочные работы в настоящее время подтверждают, что восточное крутопадающее ребро пластины известняков было использовано при формировании колонны метасоматитов и рудных тел [109]. Место формирования соответствует зоне изгиба градиентного участка кровли известняков. Во всех других направлениях, начиная с градиентного участка, происходит крутое погружение пластины на глубину (рисунок 2.3.2б). При анализе объемной структуры рудной и метасоматической системы Николаевского месторождения необходимо учитывать морфологию пластины известняков [15, 103, 110].

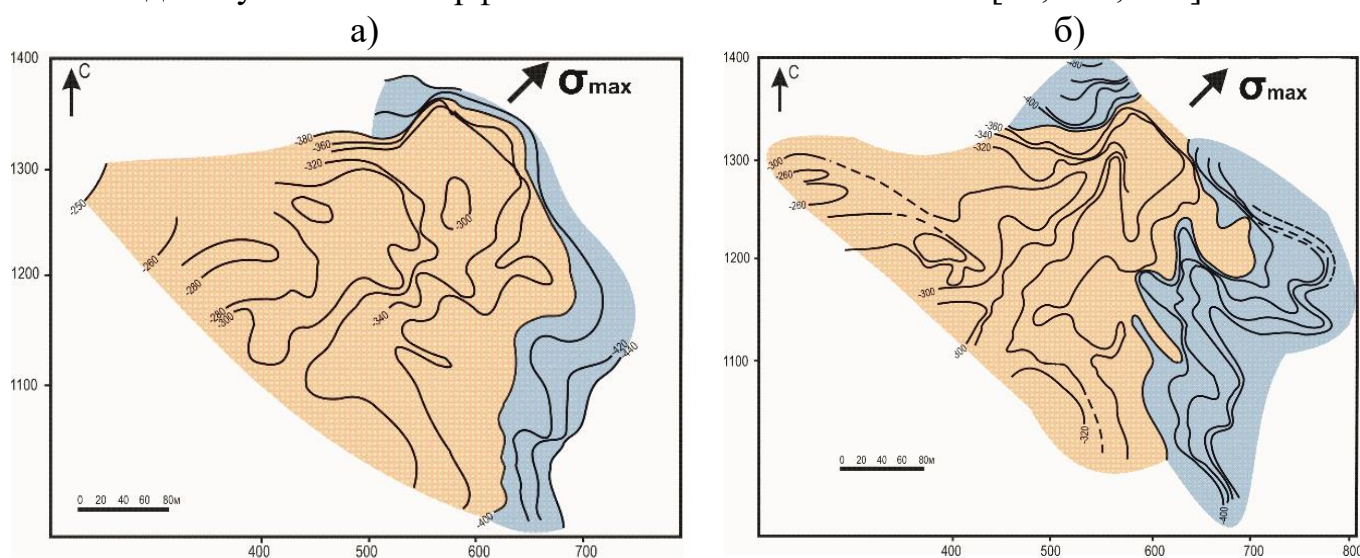


Рисунок 2.3.2 – Схематическая карта изогипс кровли нижних метасоматитов (а) и кровли крупного олистолита известняков (б): Стрелками показано направление максимальных сжимающих напряжений.

Таким образом, полученный в результате исследований материал, уточняющий морфологию элементов массива горных пород, позволил определить особенности рудной и метасоматической системы месторождения на различных глубинных уровнях.

Полученные контуры изогипс четырёх основных геологических контуров пород были перенесены в среду AutoCAD (рисунок 2.3.3, 2.3.4).

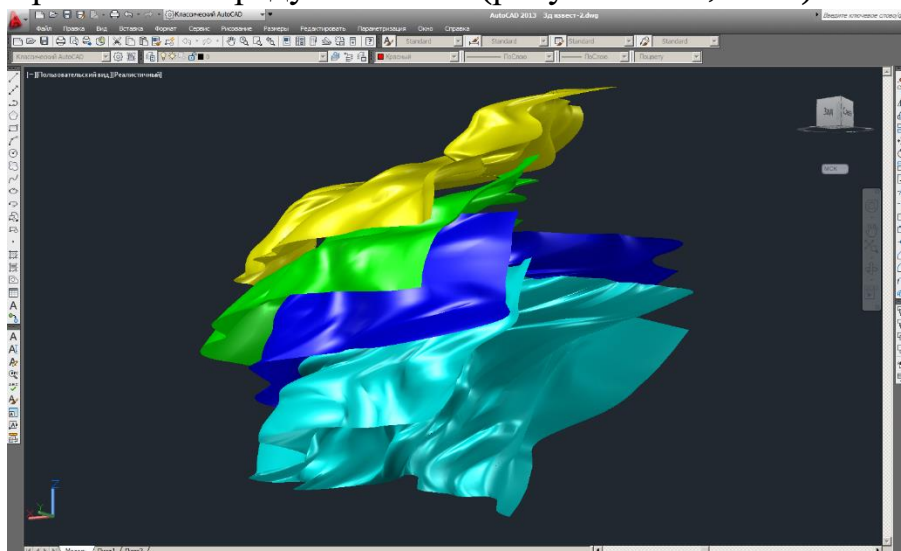


Рисунок 2.3.3 – 3D-модель поверхностей основных геологических пород глубоких горизонтов Николаевского месторождения в среде AutoCAD

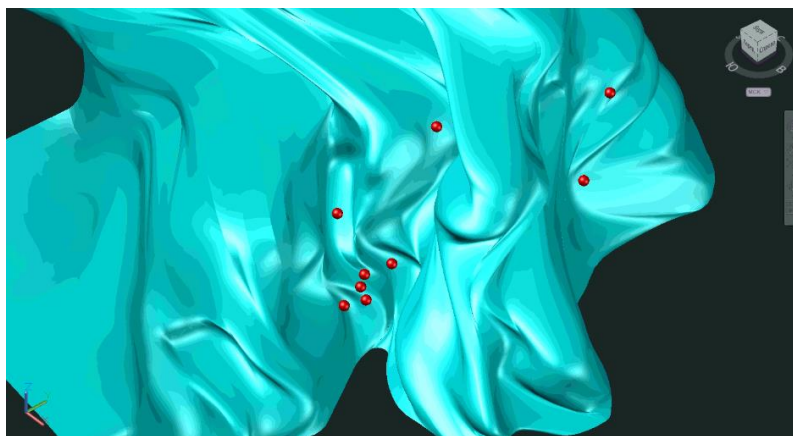
На рисунке 2.3.3 отчётливо виден динамизм геологических структур.

Таким образом, по результатам изучения структурно-геологических особенностей скарново-полиметаллического Николаевского месторождения построена 3D-модель контуров геологических пород, позволяющая более обоснованно интерпретировать результаты сейсмоакустического мониторинга.

Результаты сопоставления данных мониторинга с геологическими особенностями месторождения показали, что подавляющее большинство зарегистрированных толчков (18 толчков, 37 %) расположены в непосредственной близости (от 1 до 10 метров) к контурам кровли крупной пластины известняков. На рисунке 2.3.4 представлено расположение зарегистрированных с 2011 по 2020 г. толчков вокруг кровли олистолита известняков: а) вид сверху; б) вид снизу.

Таким образом, крупная пластина известняков выступает в структуре Николаевского месторождения в качестве одной из главных физико-механических неоднородностей геологической среды рудного поля, морфологические особенности которой определяют общую структуру месторождения и направление ее активизации в современный период.

а)



б)

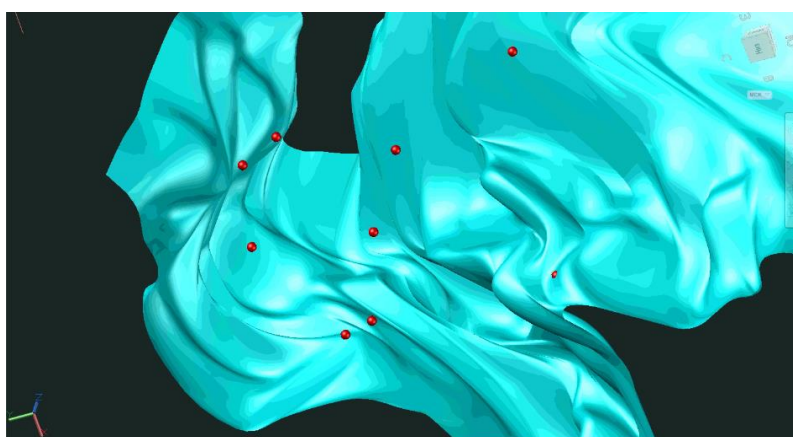


Рисунок 2.3.4 – Расположение зарегистрированных с 2011 по 2020 гг. толчков на 3D-модели кровли олистолита известняков: а) вид сверху; б) вид снизу

На рисунке 2.3.5 представлена блоковая структура тела олистолита рудовмещающих известняков Николаевского месторождения и результаты геодинамического районирования изученной части рудной залежи, опирающиеся на морфологическую выраженность районов, характеризующихся различным современным геодинамическим режимом.

Кроме того, на рисунке 2.3.5 вынесены литологические неоднородности, влияние которых на распределение динамических проявлений выявлено в процессе сейсмоакустического мониторинга.

Повышенная удароопасность массива в районе контура олистолита, в первую очередь, определяется подработкой массива вдоль разлома ТН-3, а также разломов меридионального, северо-западного и северо-восточного направлений (рисунок 2.3.5). Рост интенсивности опасных проявлений горного давления в районе контуров пластины известняков обусловлен нарушением равновесия природной системы вследствие проведения крупно-объёмных горных работ. Геодинамические

процессы протекают в форме перестройки массива и сопровождается различными по масштабу подвижками и смещениями вдоль тектонических нарушений [148, 149].

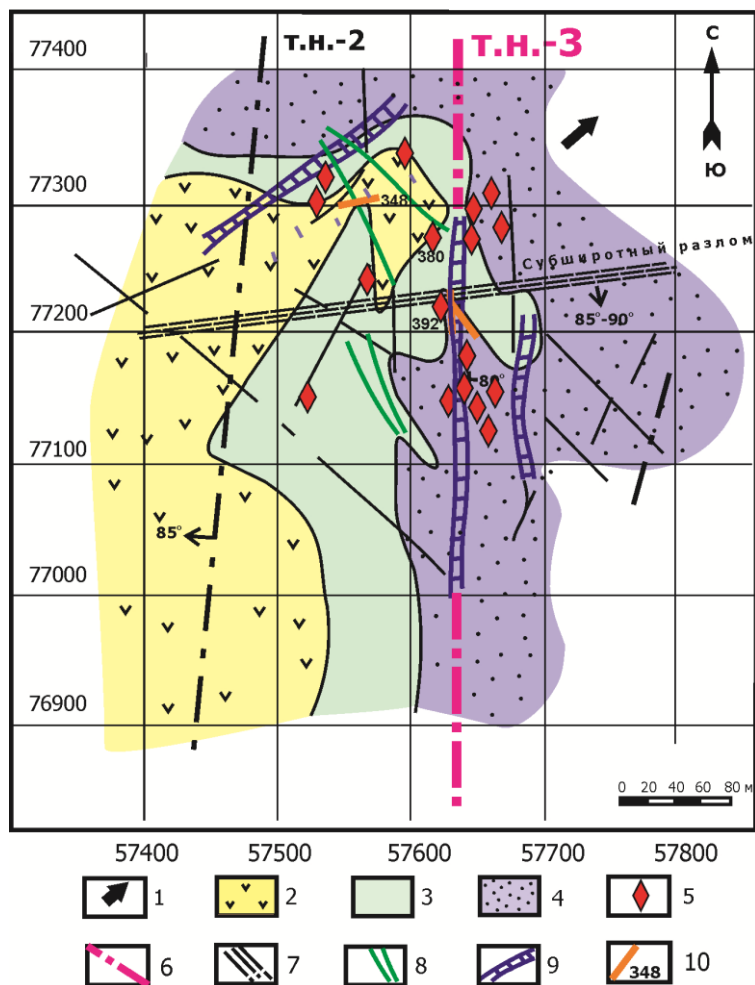


Рисунок 2.3.5 – Блоковая структура тела олистолита рудовмещающих известняков Николаевского месторождения и его геодинамическое районирование

1 – направление главного горизонтального сжатия массива горных пород; 2-4 – геодинамические районы, формируемые морфологическими особенностями олистолита и современным полем напряжений: 2 – относительно геодинамически устойчивый район; 3 – полого-склоновый район с промежуточной геодинамической активностью; 4 – крутосклонный геодинамически активный периферийный район; 5 – зарегистрированные системой «Prognost-ADS» в районе кровли олистолита известняков толчки с 2011 по 2020 г; 6 – тектонически активный разлом ТН-3; 7 – другие блокообразующие разломы и их наименование; 8 – дайки среднего и основного состава; 9 – ущелья в теле известняков, заполненные метасоматитами; 10 – местоположение разрывов и раскрытых трещин, образованных землетрясением 25.03.2016 г.

Геодинамически активный в настоящее время периферийный район олистолита, кроме того, характеризуется наличием ущелий в рельефе кровли северо-западного направления, а также увеличением градиента погружения ее абсолютных отметок. Это свидетельствует об увеличении мелкоблоковости строения тела олистолита по направлению к периферической зоне в восточном направлении (рисунок 2.3.5).

Таким образом, с понижением глубины отработки ниже гор. –400 м в пределах висячего бока крупной пластины известняков в юго-западном направлении существенно возрастает вероятность возникновения катастрофических проявлений горного давления. Это требует дополнительной корректировки применяемой технологии отработки месторождения и глубокого усиления работ по сейсмоакустическому контролю.

2.4. Статистический анализ данных сейсмоакустического контроля и взаимосвязь ключевых факторов, определяющих удароопасность месторождения

Для выявления основных факторов, определяющих проявления удароопасности и техногенной сейсмичности на глубоких горизонтах Николаевского месторождения, проведен статистический анализ 53 толчков, зарегистрированных с 2011 по 2020 год. По его итогам составлена сводная таблица, включенная в конец подраздела 2.4.

По результатам изучения данных регистрации крупных динамических проявлений горного давления установлено: 91 % из них (48 толчка) приурочены к элементам тектонической структуры; 55 % (30 толчков) зарегистрированы на пересечении с разломом ТН-3; 14 % (8 толчков) – вдоль разлома ТН-2; 13 % (7 толчков) – в районе дайковых тел; 5 % (3 толчка) – у Северо-западных нарушений блока Крайний; 4 % (2 толчка) – по субширотному разлому, 9 % (5 толчков) располагаются в массиве горных пород (рисунок 2.4.2).

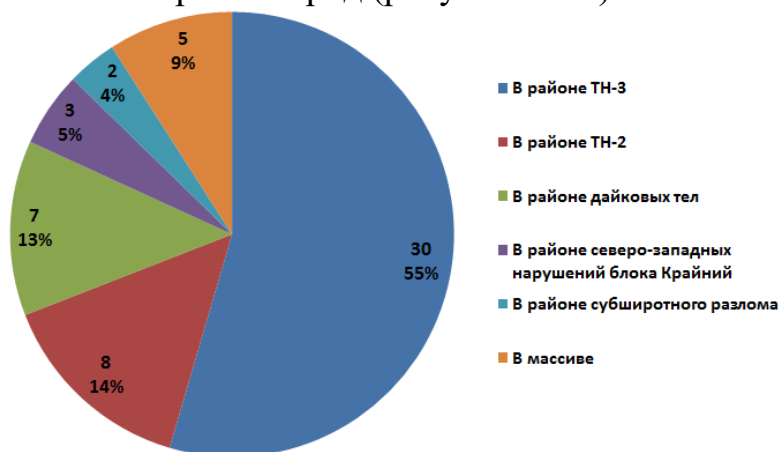


Рисунок 2.4.2 – Диаграмма приуроченности зарегистрированных толчков изученным элементам тектонической структуры Николаевского месторождения

Анализ принадлежности динамических проявлений к конкретным объектам горных работ показал: 53 % (28 толчков) зарегистрированы в районах отработки очистных блоков; 11 % (по 6 толчков) приурочены к отработке камеры 2 блока Южный-1 и блоку 45; 9 % (5 толчков) зарегистрированы в районе Север-8; 6 % (3 толчка) – в районе блока Крайний; 8 % (4 толчка) – при отработке блока 40 и других камер. Стоит отметить, что отработка всех перечисленных блоков велась вдоль активных элементов тектонической структуры. Остальные 47 % (25 толчков) зарегистрированы в глубине массива горных пород и не приурочены очистным пространствам (рисунок 2.4.3).

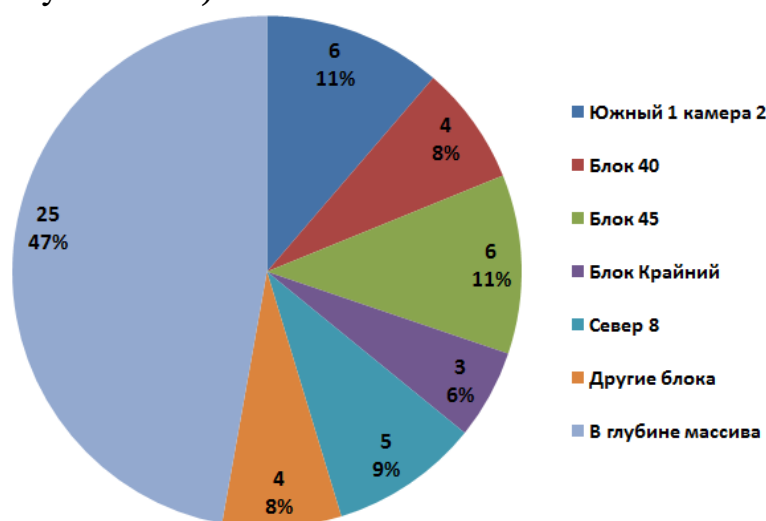


Рисунок 2.4.3 – Диаграмма приуроченности зарегистрированных толчков к очистным блокам Николаевского месторождения

По результатам анализа распределения мощных динамических проявлений горного давления по глубине установлено, что 44 % из них расположены в зоне ведения добычных работ. Стоит отметить, что зарегистрированные в зоне контроля системой «Prognoz-ADS» толчки распределяются достаточно равномерно. В среднем в отметках –440...–350 м на каждые 10 м регистрировалось от 1 до 3 толчков. 56 % (30 толчков) было зарегистрировано на глубине ниже отметки –440 м (рисунок 2.4.4).

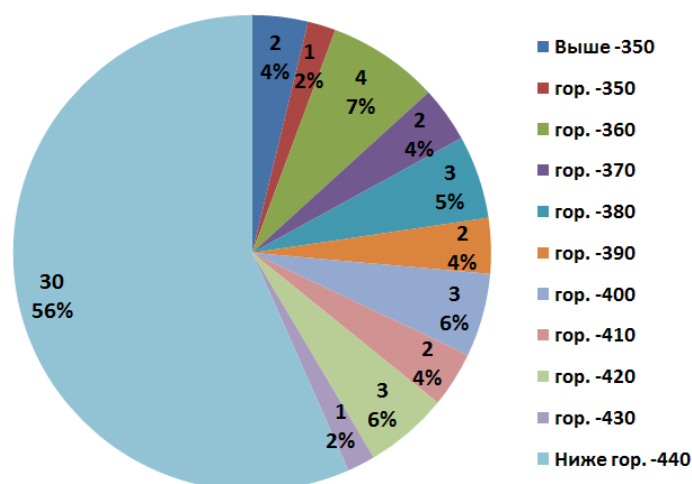


Рисунок 2.4.4 – Диаграмма распределения зарегистрированных толчков по глубинам

По результатам изучения воздействия внешних факторов на удароопасность массива горных пород установлено, что 36 % (19 толчков) инициированы проведением взрывных работ [31] и 4 % (2 толчка) зарегистрированы после сейсмических колебаний от землетрясений [8, 145]. Остальные 60 % (32 толчка) установлены под влиянием горного давления и других факторов (рисунок 2.4.5).



Рисунок 2.4.5 – Диаграмма влияния взрывных работ и геосейсмики на удароопасность Николаевского месторождения

По результатам изучения принадлежности расположения толчков геологическим контурам пород выявлено, что 34 % от общего числа (18 толчков) расположены в непосредственной близости (от 1 до 10 м) к контурам кровли олистолита известняков (рисунок 2.4.6).

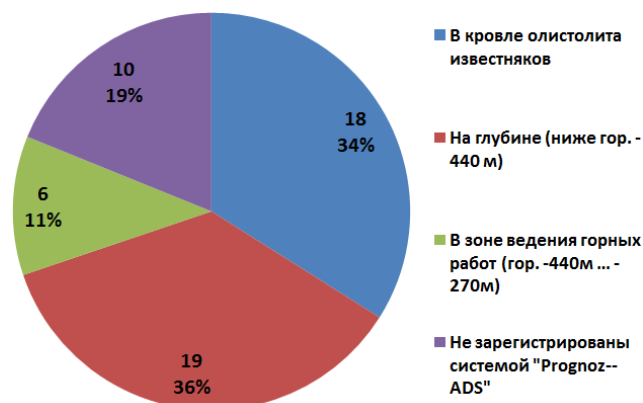


Рисунок 2.4.6 – Диаграмма приуроченности зарегистрированных толчков к геологическим контурам кровли олистолита известняков

Отдельный анализ 23 толчков, зарегистрированных системой Prognoz-ADS только в зоне ведения очистных работ в подэтажах –440...–270 м, показывает: 91 % из них (21 толчок) приурочен к элементам тектонической структуры; 70 % (16 толчков) – в районах отработки очистных блоков (камера 2 Южный-1, блок 40 и 45, Север-8, блок Крайний); координаты 78 % (18 толчков) расположены в непосредственной близости от контура кровли известняков.

Перечисленные выше критерии можно отнести к группе основных факторов, определяющих удароопасность глубоких горизонтов Николаевского месторождения. Анализ распределения числа толчков в зависимости от данных факторов показал: в 56 % случаев (13 толчков) наблюдается совпадение 3-х факторов; в 22 % (5 толчков) наблюдается приуроченность их к тектоническим структурам и кровле олистолита известняков; 13 % (3 толчка) зарегистрированы при пересечении контуров очистного блока и элементов тектонической структуры (рисунок 2.4.7).

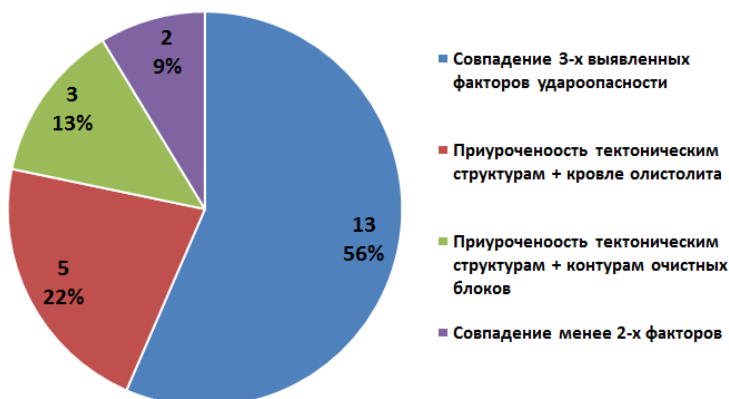


Рисунок 2.4.7 – Диаграмма распределения числа толчков в зависимости от комбинации 3-х выявленных факторов удароопасности Николаевского рудника в этаже –440...–270 м

Таким образом, основным фактором, определяющим удароопасность глубоких горизонтов Николаевского месторождения, является приуроченность ведения горных работ к тектоническим структурам. В 91 % случаев формирование удароопасных ситуаций происходит на пересечении контуров очистных блоков с этими структурами или с кровлей олистолита известняков.

Таблица 2.4.1 – Сводные статистические данные по толчкам, зарегистрированным на Николаевском месторождении в период с 2011 по 2020 гг.

Дата	Время	X	Y	Z	Энергия	Влияние сейсмике и взрывных работ	Приуроченность к тектонической структуре	Приуроченность отработке очистных блоков	Приуроченность кровле олистолита известняков
08.06.2011	Около 9:00	Не зарегистрирован системой Prognoz-ADS				-	-	Гор. -380 м, блок Южный 1 камера 2	-
03.07.2011	19:01	57520,41	77151,81	-378,63	7773,45	-	В районе ТН-2	В массиве	В кровле олистолита известняков
22.08.2011	12:57	57566,62	77243,18	-364,97	21726,88	-	В районе ТН-2	В массиве	В кровле олистолита известняков
29.08.2011	-	Не зарегистрирован системой Prognoz-ADS				-	-	-	-
09.09.2011	11:13	Не зарегистрирован системой Prognoz-ADS				-	-	Гор. -406 орт блоковый 1 восток от блока Южный 2	-
25.10.2011	15:10	57613,82	77126,16	-468,12	10924,23	-	В районе ТН-3	На глубине	-
26.10.2011	22:52	57640,96	77157,84	-437,57	22,81	После взрывных работ 22:45	В районе ТН-3	В районе Южный 1 камера 2	
18.12.2011	10:29	57486,39	77090,76	-515,72	221,76	После взрывных работ активность по датчику в скважине 4202	В районе ТН-2	В массиве на глубине	-
10.02.2012	1:59	57530,74	77302,75	-387,43	112545,594	После взрывных работ 09.02.2012 07:18 активность по датчику в скважине 3601	В районе ТН-3	В районе Север-8	В кровле олистолита известняков
14.02.2012	13:40	57645,98	77278,32	-418,57	3173,48	-	В районе ТН-3 и дайковых тел	В массиве	В кровле олистолита известняков
08.03.2012	13:02	57638,69	77158,75	-422,16	52,37	-	В районе ТН-3	В районе Южный 1 камера 2	В кровле олистолита известняков
27.03.2012	1:58	57628,34	77148,97	-381,93	202,2	-	В районе ТН-3	В районе Южный 1 камера 2	В кровле олистолита известняков
29.03.2012	11:39	57641,28	77188,59	-502,21	922,33	-	В районе ТН-3	На глубине	-
20.04.2012	15:12	57616,38	77275,71	-356,02	2199,44	После взрывных работ 15:02	В районе ТН-3 и дайковых тел	В массиве	В кровле олистолита известняков
15.05.2012	9:40	57709,3	77049,76	-328,79	709,98	Активность после проведения взрывных работ 07:11	-	В массиве	-

Продолжение таблицы 2.4.1

09.07.2012	16:44	57642,22	77022,73	-270,28	182,71	-	В районе ТН-3	Камера 1, 2 блок 7	-
07.11.2012	16:38	57658,83	77127,48	-413,63	684,9	-	В районе ТН-3	В районе Южный 1 камера 2	В кровле олистолита известняков
16.12.2013	11:00	Не зарегистрирован системой Prognoz-ADS				15.12.2013 землетрясение на Камчатке 5,3 балла	-	По журналу на глубине в массиве	-
19.12.2013	10:34	57640,11	77176,29	-423,49	3015,02	-	В районе ТН-3	В районе Южный 1 камера 2	В кровле олистолита известняков
03.03.2014	10:35	Не зарегистрирован системой Prognoz-ADS				-	-	В глубине массива	В кровле олистолита известняков
18.12.2014	9:31	57663,85	77156,05	-374,6	724,47	После проведения взрывных работ	В районе ТН-3	В районе блока 40	В кровле олистолита известняков
25.12.2014	8:49	57656,61	77140,71	-409,44	32633,93	После проведения взрывных работ	В районе ТН-3	В районе блока 40	В кровле олистолита известняков
23.03.2015	3:13	57471,47	77387,04	-538,11	182635,06	-	-	На глубине в массиве	-
05.10.2015	9:45	Не зарегистрирован системой Prognoz-ADS				-	В районе ТН-2	В районе Север-8	-
31.10.2015	1:15	Не зарегистрирован системой Prognoz-ADS				-	-	В районе Север-8	-
25.03.2016	0:57	57666,39 7	77270,06 6	-575,81	10730,56	После землетрясения 4 балла в поселке Каменка на побережье Японского моря	В районе ТН-3	На глубине в массиве	-
27.03.2016	1:05	Не зарегистрирован системой Prognoz-ADS				-	В районе ТН-3	На гор. -406 блок 40	-
06.04.2016	6:47	Не зарегистрирован системой Prognoz-ADS				-	В районе ТН-3	В районе блока 40	-
10.11.2016	15:48	57660,51	77308,72	-366,38	235,87	-	В районе ТН-3 и дайковых тел	В массиве	В кровле олистолита известняков
25.11.2016	11:12	57749,13	77085,57	-390,3	1129,06	-	В районе дайковых тел и системе северо-западных нарушений	В районе блока Крайний	-
27.11.2016	8:16	57555,64	77025,86	-688,46	10393,24	После проведения взрывных работ в 07:12	В районе дайковых тел и системе северо-западных нарушений	На глубине в массиве	-
20.02.2017	16:00	57732,95	77061,01	-392,72	2372,61	После проведения взрывных работ в 15:11	-	В районе блока Крайний?	-
02.03.2017	11:24	57733,29	77071,89	-365,82	442,36	-	В районе дайковых тел и системе северо-западных нарушений	В районе блока Крайний	-
01.11.2017	2:42	57595,22	77341,18	-383,25	2158,64	После проведения взрывных работ 31.10.2017 в 22:27	В районе дайковых тел	В районе блока Север 8 (СВ)	В кровле олистолита известняков

Продолжение таблицы 2.4.1

23.06.2018	19:33	57636,11	77234,65	-459,16	9977,76	23 июня 2018 года UTC, 19:04 произошло землетрясение магнитудой 4,2 в Японии.	В районе ТН-3	На глубине и в зоне опорного давления блока 45	-
28.06.2018	7:11	57622,56	77222,15	-366,4	11609,05	После взрывных работ 07:11 на гор. -390 м блок 45	В районе ТН-3	В районе блока 45	В кровле олистолита известняков
09.11.2018	22:34	57481,99	77021,39	-617,38	281137,56	После взрывных работ 22:23 в районе блока Нижний и блока ОПБ	В районе ТН-2	На глубине в массиве	-
25.03.2019	18:53	Не зарегистрирован системой Prognoz-ADS				После взрывных работ 18:23	В районе ТН-3	В районе блока ОПБ	-
28.03.2109	7:21	57654,9	77244,29	-486,14	552,05	После взрывных работ 07:20	В районе ТН-3	На глубине и в зоне опорного давления блока 45	-
	7:22	57533,97	77322,03	-409,34	1706,1		В районе ТН-2	В районе Север-8	В кровле олистолита известняков
	7:24	57544,44	77249,53	-515,05	4119,9		В районе ТН-2	На глубине в массиве	-
01.07.2019	9:20	57490,01	77312	-584,16	86463,09	-	В районе ТН-2	На глубине в массиве	-
15.08.2019	7:11	57647,43	77294,42	-425,57	10725,42	После взрывных работ 06:31 гор. -406 камера 2 блок 45	В районе ТН-3	В районе блока 45	В кровле олистолита известняков
10.10.2019	11:34	57668,78	77283,58	-407,19	4549,21	-	В районе ТН-3	В районе блока 45	В кровле олистолита известняков
16.10.2019	12:01	57644,63	77234,26	-542,57	37937,55	-	В районе ТН-3	На глубине	-
17.11.2019	9:10	57617,78	76917,85	-523,59	14815	-	В районе ТН-3	На глубине	-
11.01.2020	12:20	57657,08	77205,21	-520,21	19094,93	-	В районе ТН-3 и субширотного разлома	На глубине и в зоне опорного давления блока 45	-
28.03.2020	14:02	57539,52	77182,31	-569,22	91674,65	-	В районе субширотного разлома	На глубине	-
11.04.2020	09:02	57655,51	77187,25	-458,21	4950,42	После проведения взрывных работ 11.04.2020 в 06:38	В районе ТН-3	На глубине в массиве	-
26.05.2020	01:08	57645,13	77241,08	-477,29	2505,11	После проведения взрывных работ 25.05.2020 в 22:38	В районе ТН-3	На глубине	-
18.06.2020	05:10	57613,34	76923,07	-491,46	4986,94	-	В районе ТН-3	На глубине	-
07.12.2020	19:54	57655,96	77257,04	-460,67	12521,01	После проведения взрывных работ 07.12.2020 в 18:38	В районе ТН-3	На глубине, в районе блока ОПБ	-

Выводы по главе 2:

1. По результатам сейсмоакустического мониторинга выявлены особенности формирования поля напряжений, обусловленные тектонической структурой массива горных пород и сложной геометрией выработанных пространств. Наибольшее число регистрируемых АЭ-событий приурочено к сети разломов, и особенно к зоне активного крутопадающего разлома ТН-3 с сопутствующими системами трещиноватости, крутопадающих дайковых тел, преимущественно северо-западного направления.

2. Построена 3D-модель изогипс контуров основных горных пород, позволяющая сопоставлять данные сейсмоакустического мониторинга с геолого-структурными особенностями скарново-полиметаллического Николаевского месторождения для наглядного отображения геомеханических процессов и установления причин и факторов формирования удароопасных ситуаций в целях последующего оперативного управления горным давлением.

3. Установлено местоположение характерных для Николаевского месторождения динамических проявлений – толчков в массиве горных пород. Крупная пластина известняков выступает в структуре месторождения в качестве главной физико-механической неоднородности геологической среды рудного поля, морфологические особенности которой определяют общую структуру месторождения и направление ее активизации в современный период. Координаты 78 % (18 толчков) расположены в непосредственной близости (от 1 до 10 м) от контура кровли олистолита известняков). Из 23 толчков, зарегистрированных системой «Prognoz-ADS» в зоне ведения очистных работ в подэтажах –440...–270 м более 90 % (21 толчок) приурочено к элементам тектонической структуры, 70 % (16 толчков) – к районам отработки очистных блоков (камера 2 Южный-1, блок 40 и 45, Север-8, блока Крайний и ОПБ). Перечисленные выше особенности динамических проявлений можно отнести к группе основных факторов, определяющих удароопасность глубоких горизонтов месторождения.

4. В качестве главного фактора, предопределяющего удароопасность на глубоких горизонтах Николаевского месторождения, выступает приуроченность участков регистрации крупных динамических проявлений горного давления к

известным разломным структурам: в 91 % случаев формирование удароопасных ситуаций происходит на пересечении их контурами очистных блоков или кровлей олистолита известняков.

5. В процессе проведения десятилетних сейсмоакустических наблюдений на Николаевском месторождении установлена особенность отработки глубинной его части, сопровождаемая изменением геомеханических процессов, отражающихся в появлении и активизации акустически активных зон, регистрируемых при увеличении объемов добычи вдоль разломных структур и на пересечении с контуром олистолита известняков; выявленная закономерность требует дополнительного изучения методом математического моделирования для обоснования комплекса противоударных и разгрузочных мероприятий, которые позволят эффективно и оперативно управлять горным давлением на глубоких горизонтах месторождения.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ НА ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТАХ НИКОЛАЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

3.1. Методика математического моделирования напряженно-деформированного состояния структурно-неоднородного массива горных пород

Опыт отработки удароопасных месторождений показывает, что при углублении горных работ происходит перераспределение исходных полей напряжений и активизация геодинамических процессов, что приводит к росту динамических проявлений горного давления и снижению безопасности горного производства. Безопасность и эффективность горных работ в подобных условиях во многом зависят от своевременного прогноза зон опасных концентраций напряжений, а также от точной оценки степени влияния очистной выемки и тектонической структуры месторождения на изменение НДС конструктивных элементов применяемой системы разработки. Это позволяет, как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации месторождений, определять рациональные параметры конструктивных элементов систем разработки и безопасный порядок ведения горных работ.

Одним из эффективных подходов к исследованию особенностей напряженного состояния конструктивных элементов систем разработки и окружающего массива считается численное моделирование НДС методом конечных элементов (МКЭ), который широко применяется в последние годы как для исследования и прогноза горных ударов, так и для решения разнообразных геомеханических задач [65, 106, 128]. Применение данного метода дает возможность не только строить прогнозные карты НДС отдельных участков рудничного поля, являющиеся основой для перспективного планирования горных работ, но и устанавливать важные закономерности формирования полей напряжений, что позволяет учитывать особенности структурно-геологического строения месторождения и параметры применяемых технологических схем.

Моделирование НДС массива пород нижней части Николаевского месторождения осуществлялось с помощью программного комплекса FEM [38]. Программа предназначена для решения задач теории пластичности и упругости методом конечных элементов в плоской и объемной постановке. Комплекс состоит из программных модулей:

1. FEM1 (FEMV1 – для расчета в объеме) – для дискретизации области деформирования;
2. FEM2-3 (FEMV2-3) – для задания деформационных и прочностных свойств элементов, ввода граничных и начальных условий и собственно проведения расчета НДС;
3. FEM4 (FEMV4) – модуль визуализации результатов расчетов;
4. Дополнительные программы Grid2d (Grid3d), Usel (Uselv), Bound (Boundv) и Zero (Zerov);
5. Программа FemHelper [115].

Программный комплекс FEM допускает задание как однородного, так и неоднородного породных массивов с любым видом неоднородностей: различной конфигурации геологических структур, выработок, а также других элементов очистного пространства и тектонической структуры.

Моделирование геологической среды осуществляется с помощью конечных элементов, описываемых линейным интерполяционным полиномом и имеющих треугольную (в плоскости) или тетраэдральную (в объеме) форму. Кроме того, для моделирования трещин и поверхностей ослабления используются специальные контакт-элементы, имеющие нулевую толщину и фиктивную толщину, равную первоначальному раскрытию трещины. Функциональные возможности программного комплекса FEM [106] позволяют объединять отдельные области с образованием на их границе контакт-элементов, имитирующих трещины. При этом узлы на границах сшиваемых подобластей должны попарно совпадать в пространстве. Программный комплекс FEM также предусматривает возможность чередования свойств смежных контакт-элементов.

Для расчета НДС каждый макроэлемент в модели должен содержать информацию об упругих и прочностных характеристиках построенной среды:

модуль деформации (МПа), коэффициент Пуассона, плотность среды (т/м^3), начальный угол внутреннего трения (град), начальное сцепление (МПа), начальная прочность на растяжение (МПа), а также остаточные прочностные характеристики.

Для задания физико-механических свойств трещин используются: модули деформации (МПа) и коэффициенты Пуассона материала трещины по слоистости и вкрест нее, модуль сдвига в плоскости трещины (МПа), начальные прочностные свойства – угол трения по контакту (град), сцепление на контакте (МПа), прочность контакта на растяжение (МПа), остаточный угол трения по контакту (град), остаточное сцепление (МПа) и остаточная прочность контакта на растяжение, начальное раскрытие трещин (м), минимально возможный модуль сдвига на трещине.

Согласно представлениям Петухова И.М. и Батугиной И.М., при деформировании вдоль разломных структур реализуется дискретный (толчкообразный) характер разрушения по поверхности среза [72]. За счёт неровных контактов на поверхности разрушения имеют место выступы, несущие повышенные нагрузки, и вдающиеся участки, представляющие зоны разгрузки (рисунок 3.1.1). Поэтому при моделировании разлома ТН-3 он разбивался на участки длиной 5 м с чередованием высоких и низких прочностных свойств, представленных в таблице 3.1.1.

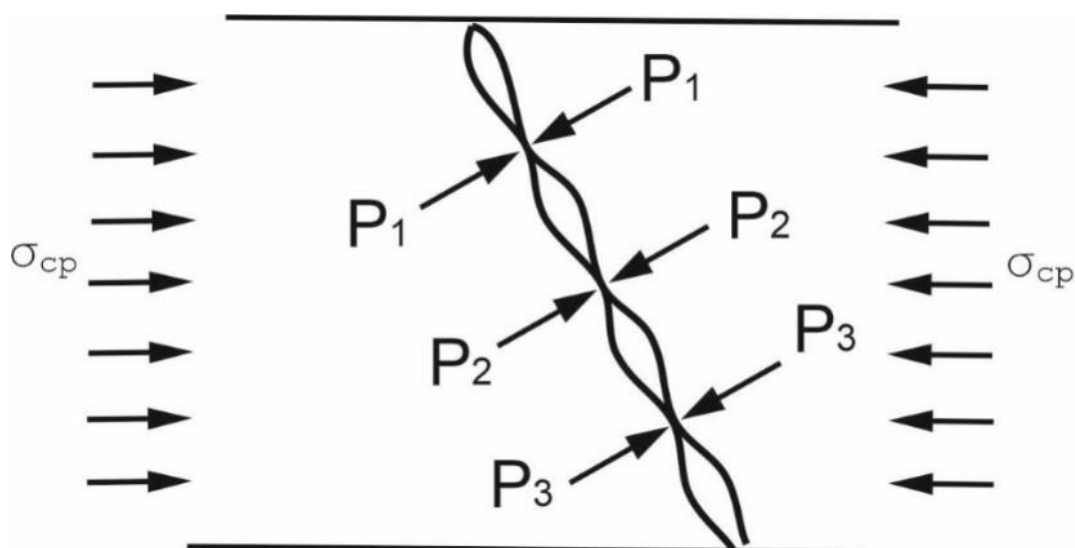


Рисунок 3.1.1 – Схема к механизму дискретного (толчкообразного) деформирования при срыве сцепления по разлому в ослабленной зоне между тектоническими блоками [72]

Физико-механические свойства горных пород Николаевского месторождения определены как в лабораторных, так и в натурных условиях [16, 77]. Механические исследования свойств на образцах показали, что руда и практически все горные породы, представленные на месторождении, обладают высокой прочностью и упругостью, а также способны накапливать потенциальную энергию упругого сжатия и хрупко разрушаться в динамической форме.

Физико-механические свойства пород, использованные для расчета НДС массива нижней части Николаевского месторождения, представлены в таблице 3.1.1.

Таблица 3.1.1 – Прочностные и упругие характеристики пород, используемые при моделировании напряженно-деформированного состояния массива горных пород

Наименование пород	Предел прочности на сжатие, МПа	Плотность, кг/м³	Деформационные свойства		Прочность на растяжение, МПа	Угол внутреннего трения, град	Сцепление С, МПа
			Модуль деформации E, МПа	Коэффициент Пуассона			
Руда							
Рудный скарн	98	3560	80000	0,3	8,4	41,5	7,9
Вмещающие породы							
Известняк	99,0	2750	49400	0,20	4,7	42	4,5
Туфы кварцевых порфиров	99,6	2650	65000	0,24	8,3	41,5	6,5
Безрудный геденбергитовый скарн	135,2	3390	86000	0,28	8,4	41,5	7,9
Тектонически активная зона ТН-3							
Участок ТН-3 с высокими прочностными свойствами	-	-	100000	0,4	1,5	12	1,5
Участок ТН-3 с низкими прочностными свойствами	-	-	500	0,1	1,5	12	1,5

Алгоритм расчета НДС детально описан в работе [117]. Вся расчетная область представляется набором подобластей, каждая из которых может иметь свои деформационные и прочностные характеристики и автоматически делиться на конечные элементы. Границы подобластей определяются геометрией поверхностей раздела деформационных неоднородностей.

При задании нагрузок по границам модели учитывались результаты ранее проведенных геомеханических исследований, при которых было установлено, что в массиве Николаевского месторождения действует неравнокомпонентное исходное поле напряжений, в котором преобладают горизонтальные тектонические напряжения, в 1,5–2,5 раза превышающие вертикальную гравитационную

составляющую. На основании анализа расположения моделируемого участка установлено, что первые главные напряжения (превышающие гравитационную составляющую в 2,5 раза) действуют под углом в $42,5^\circ$ к субмеридиональной геодинамически активной зоне ТН-3, вторые главные напряжения (в 1,5 раза превышающие гравитационную составляющую) действуют под прямым углом к первым главным напряжениям.

Расчеты напряженно-деформированного состояния массива горных пород проводились при следующих граничных условиях:

- на глубине 600 м от поверхности (горизонт -220 м) первые главные напряжения (координата Y) принимались равными $\sigma_1 = 41,72$ МПа. Вторые главные напряжения (координата X) принимались равными $\sigma_2 = 24,72$ МПа. Напряжения, действующие в вертикальной плоскости (координата Z) принимались равными $\sigma_3 = 16,48$ МПа;

- на глубине 900 м от поверхности (горизонт -520 м) $\sigma_1 = 61,8$ МПа, $\sigma_2 = 31,1$ МПа, $\sigma_3 = 24,72$ МПа;

Сдвиговые компоненты (τ_{yx} , τ_{yz} , τ_{xz}) принимались равными 0.

Анализ напряжений в массиве горных пород и их представление в виде изолиний производилось по значениям максимальных сжимающих и растягивающих напряжений, а также средних нормальных и интенсивности касательных напряжений. В плоской постановке $\sigma_{cp} = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ и $\tau_{инт} = (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \sqrt{2}/2$; в объемной – $\sigma_{cp} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ и $\tau_{инт} = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_{cp})^2 + (\sigma_2 - \sigma_{cp})^2 + (\sigma_3 - \sigma_{cp})^2}$.

Для обоснования мер безопасности при отработке удароопасного Николаевского месторождения, прежде всего, необходимо было, по результатам математического моделирования, установить уровень напряжений в наиболее напряженных конструктивных элементах системы разработки, сопоставив их с прочностными свойствами рудного и породного массивов.

При оценке прочности горных пород наиболее часто применяют критерии хрупкого и сдвигового разрушения [4, 40, 133].

Хрупкое разрушение обусловлено превышением максимальных прочностных характеристик пород в массиве. Первый критерий определяется как

превышение максимальных сжимающих напряжений над пределом прочности пород на сжатие с учётом нарушенности массива [40]:

$$\sigma_{\max_сж} \leq K_s \cdot \sigma_{сж} \quad (3.1)$$

Где $\sigma_{\max_сж}$ —максимальные сжимающие напряжения, действующие в массиве, МПа; K_s – коэффициент структурного ослабления; $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие, МПа.

Сдвиговое разрушение характеризуется превышением касательных напряжений сил сцепления и трения. Согласно критерию Кулона-Мора, разрушение происходит, когда действующая интенсивность касательных напряжений становится равной пределу прочности пород на срез [38].

Данное условие определяется из следующего выражения:

$$\tau_{\text{инт}} \leq C + \sigma \cdot \tan \varphi, \quad (3.2)$$

где $\tau_{\text{инт}}$ – предел прочности породы на сдвиг, МПа; C – сцепление, МПа; σ – нормальное напряжение, действующее на площадке разрушения, МПа; φ – угол внутреннего трения.

Предельные значения напряжений, выступавшие критериями разрушения для условий Николаевского месторождения, представлены в таблице 3.1.2.

Таблица 3.1.2 – Прочностные свойства горных пород Николаевского месторождения и критерии хрупкого и сдвигового разрушения

Тип породы	Коэффициент структурного ослабления K_s	Угол внутреннего трения φ , град	Сцепление C , МПа	Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, МПа	Предел прочности на растяжение σ_p , МПа	Предельное сжимающее напряжение $\sigma_{\max_сж}$, МПа	Предел прочности на сдвиг τ , МПа
Рудный скарн	0,8	41,5	7,9	98	8,4	78,4	75,6
Известняк	0,8	42	10	99	4,7	79,2	79,3
Туфы кварцевых порфиров	0,8	41,5	6,5	99,6	8,3	79,7	75,7
Безрудный геденбергитовый скарн	0,8	41,5	7,9	135,2	8,4	108,1	102

Полученные данные использованы для оценки удароопасности конструктивных элементов системы разработки Николаевского месторождения

путем сопоставления предельно допустимых расчетных значений прочностных свойств пород (таблица 3.1.2) с результатами моделирования НДС.

3.2. Особенности формирования полей напряжений при отработке очистных блоков рудных залежей «Восток-1» и «Харьковская»

Оценка НДС конструктивных элементов применяемой камерной системы разработки осуществлялась на примере последовательной отработки камер 3 и 4 блока 7 рудной залежи «Харьковская» [36, 113, 114]. Моделировали пять этапов отработки:

1. После полной отработки камеры 2 блока 7 (до начала отработки камер 3 и 4 блока 7).
2. Отработка камер 3 и 4 блока 7 на гор. –287 м.
3. Отработка камер 3 и 4 блока 7 на гор. –307 м.
4. Отработка камер 3 и 4 блока 7 на гор. –323 м (после полной отработки камер 3 и 4 блока 7).

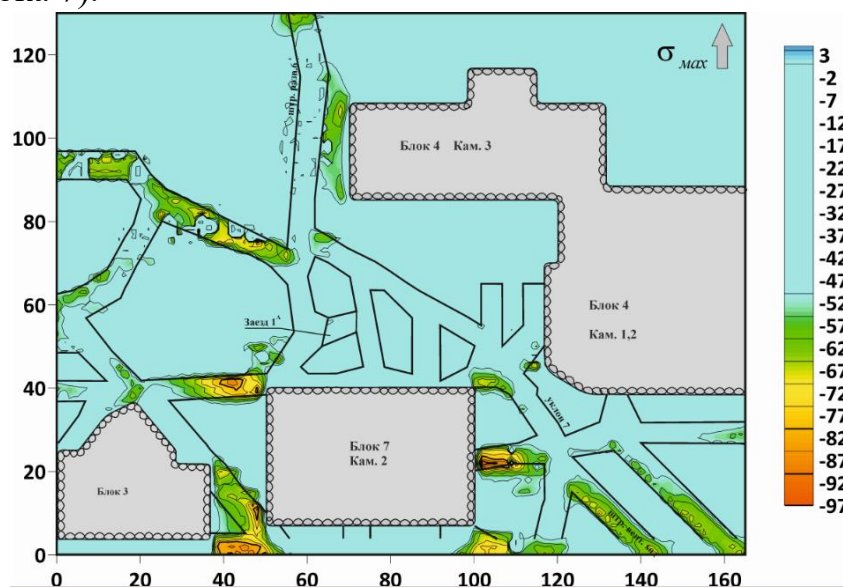


Рисунок 3.2.1 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x в кровле штреков, расположенных на гор. –287 м до начала отработки камер 3, 4 блока 7 рудной залежи «Харьковская»

Анализ результатов математического моделирования показал, что в районе камер 3, 4 под влиянием очистных работ блока 7 происходит формирование сложного поля напряжений, характеризующегося наличием как областей разгрузки

(в бортах выработок и очистных блоков), так и высоких концентраций напряжений в краевых частях массива и кровле штреков.

На горизонтах -287 м и -307 м зоны с высоким уровнем концентраций напряжений приурочены к участкам массива, прилегающего к камере 2 блока 7, преимущественно в кровле штреков (рисунок 3.2.1 и 3.2.2). Концентрации формируются за счет высоких значений действующих горизонтальных напряжений σ_y и достигают значений более 90 МПа, приближаясь к предельным значениям. Касательные напряжения на этих горизонтах не превышают 65 МПа.

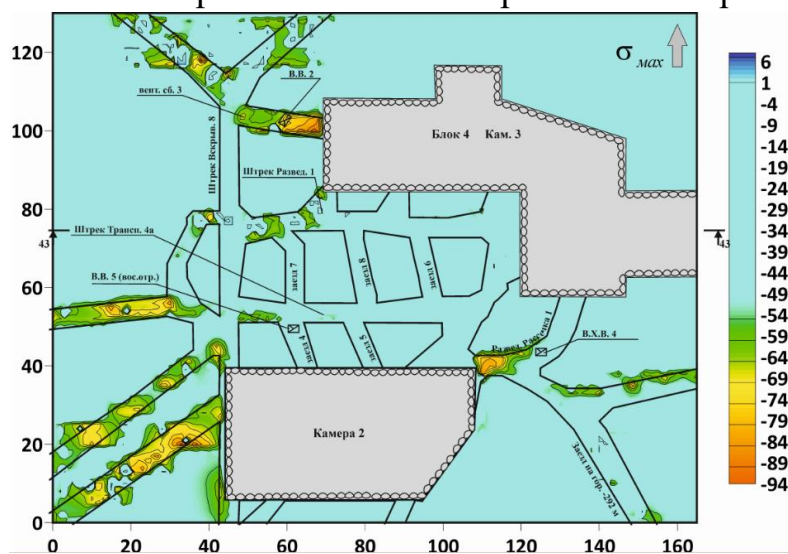


Рисунок 3.2.2 – Распределение горизонтальных напряжений σ_y в кровле штреков, расположенных на гор. -307 м до начала отработки камер 3, 4 блока 7 рудной залежи «Харьковская»

В процессе выемки запасов блока на гор. -287 м и -307 м существенного изменения геомеханической ситуации не происходит. Наибольшие изменения наблюдаются на гор. -323 м после полной отработки (рисунок 3.2.3, 3.2.4).

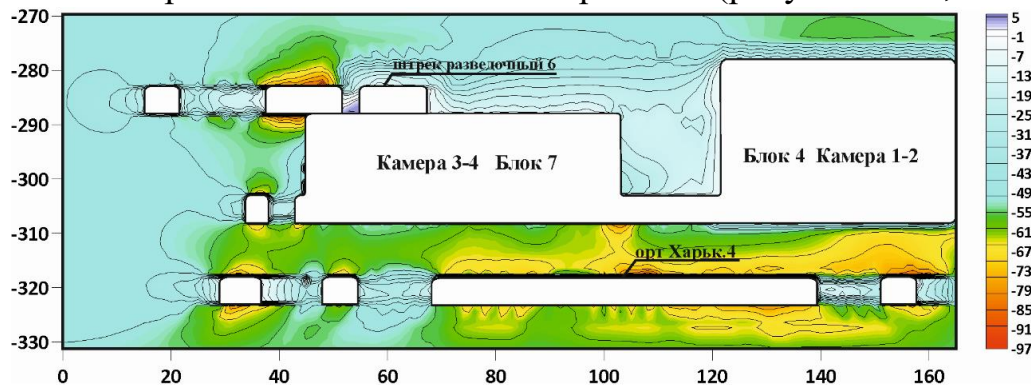


Рисунок 3.2.3 – Распределение горизонтальных напряжений σ_y после полной отработки камер 3 и 4 блока 7 рудной залежи «Харьковская» в проекции на разрез 43-43

На рисунке 3.2.4 представлено распределение горизонтальных напряжений σ_y в кровле горных выработок, расположенных на гор. –323 м до начала (а) и после полной отработки (б) камер 3 и 4 блока 7. До начала отработки камер средние значения напряжений в кровле находились в диапазоне 70–80 МПа (рисунок 3.2.4а). После полной отработки камер 3 и 4 блока 7 наблюдается увеличение сжимающих напряжений на 10–15 % (рисунок 3.2.4б).

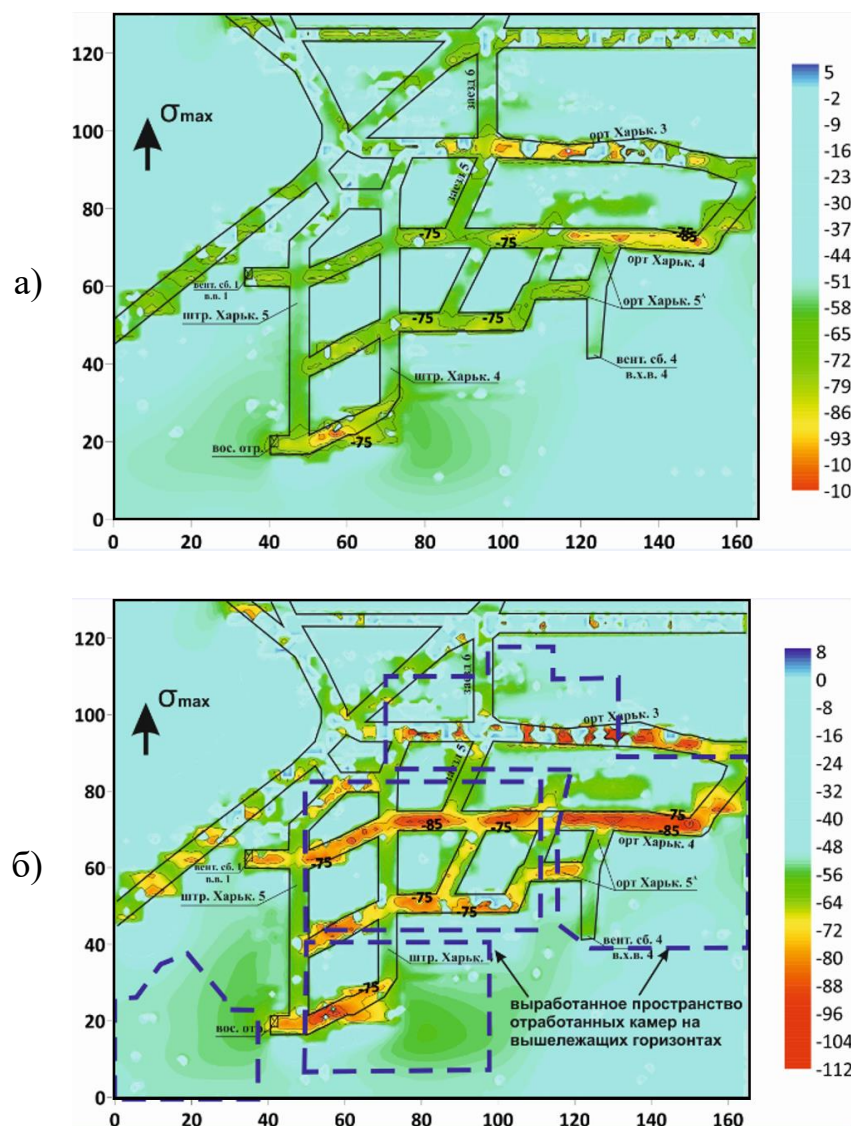


Рисунок 3.2.4 – Распределение горизонтальных напряжений σ_y в кровле горных выработок, расположенных на гор. –323 м до начала (а) и после полной отработки (б) камер 3 и 4 блока 7 рудной залежи «Харьковская»

Также стоит отметить, что наибольшие концентрации напряжений (112 МПа) выявлены в кровле выработок, расположенных перпендикулярно действию максимальных напряжений в зоне опорного давления очистных блоков,

отработанных на вышележащих горизонтах (рисунок 3.2.4). Исследование влияния напряжённого состояния массива в кровле выработки в зависимости от направления действию максимальных напряжений более подробно описано в подразделе 3.4.

Кроме рудной залежи «Харьковская» повышенной удароопасностью характеризуется также участок рудной залежи «Восток-1», расположенный в районе тектонически активной зоны, но на более глубоких горизонтах [82, 93].

При исследовании НДС массива необходимо оценивать не только удароопасность конструктивных элементов системы разработки, но и изменение характера распределения напряжений при поочерёдной отработке очистных блоков. В связи с этим моделирование отработки очистных блоков участков рудной залежи «Восток-1» осуществлялось в несколько последовательных этапов:

1. После полной отработки камеры 1 блоков Южный-1 и Южный-2;
2. Отработка камеры 3 блока Южный-2;
3. Отработка камеры 2 блоков Южный-1 и Южный-2;
4. В процессе и после полной отработки блока 40;
5. В процессе и после полной отработки блока 45.

На начальном этапе отработки южной части залежи «Восток-1» наиболее высокие концентрации наблюдаются в кровле горных выработок, расположенных в зоне опорного давления камеры 1 блоков Южный-1 и 2 (рисунок 3.2.5).

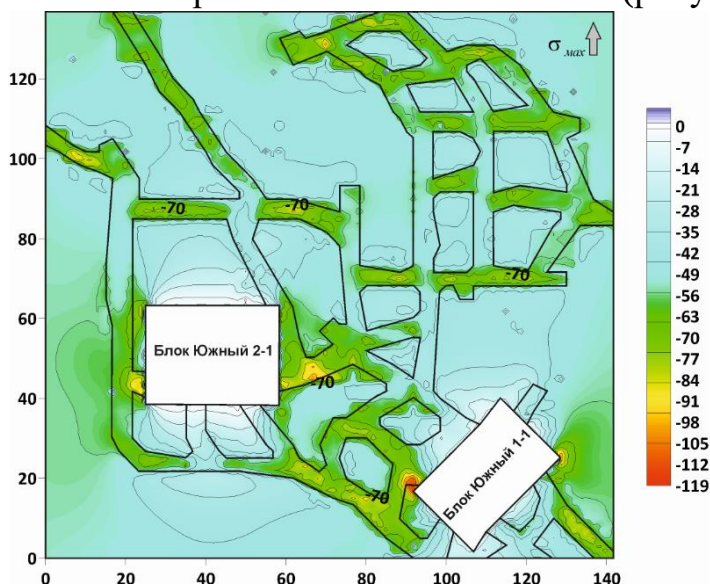


Рисунок 3.2.5 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x в южной части рудной залежи «Восток-1» до начала отработки камеры 3 блока «Южный-2» в проекции на гор. –406 м

Максимальная величина горизонтальных напряжений достигает 119 МПа, но при этом их концентрация в кровле штреков, расположенных за пределами очистных блоков, не превышает предельно допустимых значений и в среднем варьируется в диапазоне от 55 до 65 МПа (рисунок 3.2.5).

Отработка камеры 3 блока Южный-2 не приводит к существенному изменению характера распределения напряжений. Интенсивность касательных напряжений в кровле выработок на гор. –406 м в среднем составляет 35–45 МПа, а в районе камеры 1 блока Южный-2 достигает 76 МПа (рисунок 3.2.6).

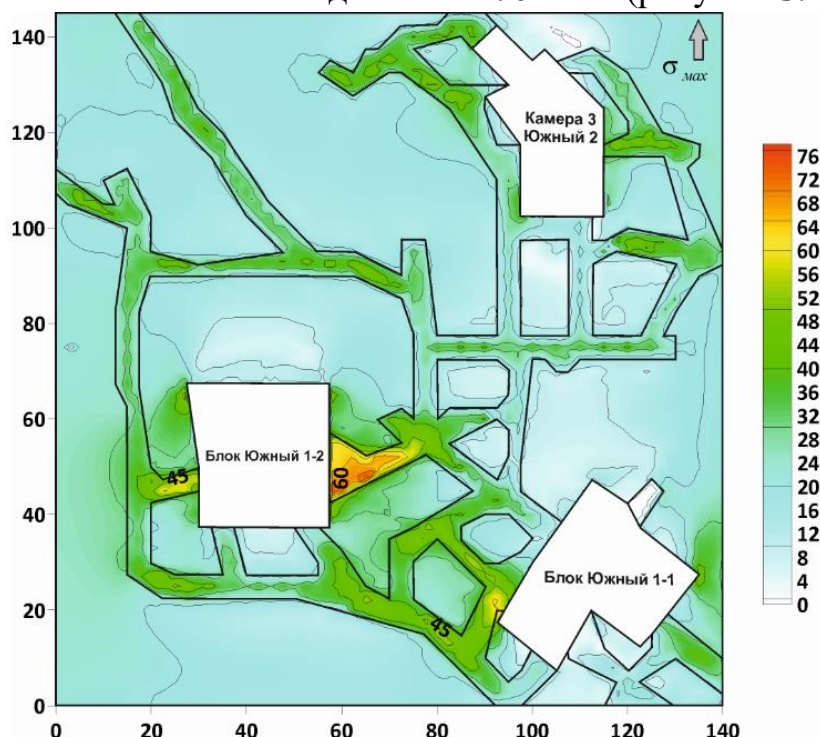


Рисунок 3.2.6 – Распределение касательных напряжений $\sigma_{шт}$ в южной части рудной залежи «Восток-1» после отработки камеры 3 блока «Южный-2» в проекции на гор. –406 м

По результатам расчетов установлены также высокие концентрации горизонтальных напряжений в кровле горных выработок на нижележащем горизонте –420 м (рисунок 3.2.7). При этом наибольшие значения 93 МПа наблюдаются в кровле выработок, расположенных под днищем камеры 1 блоков Южный-1 и Южный-2. Стоит также отметить, что выработки на гор. –420 м расположены под углом 45° к направлению максимальных сжимающих напряжений, что обеспечивает равномерное распределение напряжений (рисунок 3.2.7).

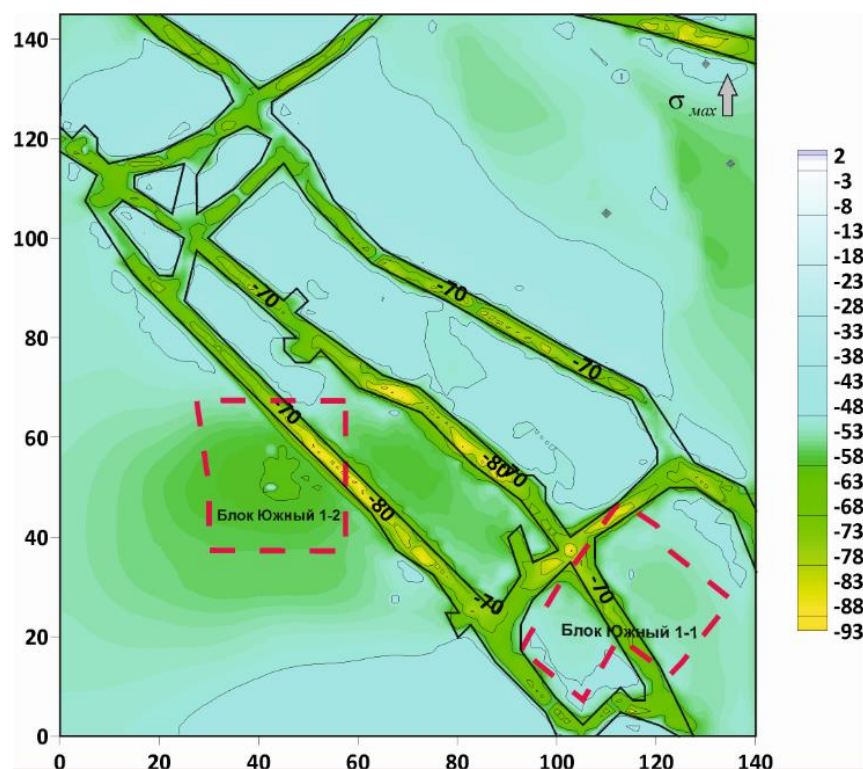


Рисунок 3.2.7 – Распределение горизонтальных напряжений σ_h в кровле штреков, расположенных на гор. –420м после отработки камер 1 и 2 блока «Южный-1»

Существенное изменение геомеханической ситуации наблюдается после полной отработки камеры 2 блока Южный-1 и Южный-2 (рисунок 3.2.8)

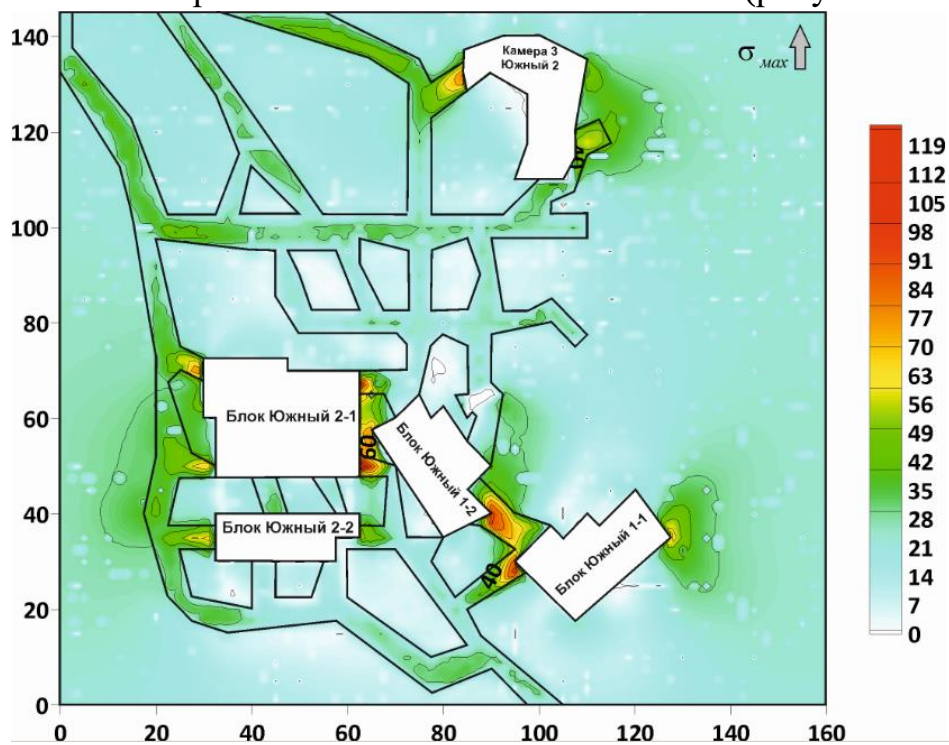


Рисунок 3.2.8 – Распределение касательных напряжений σ_{int} в южной части рудной залежи «Восток-1» после отработки камеры 2 блока «Южный-1» в проекции на гор. –390 м

На гор. –390 м интенсивность касательных напряжений достигает 119 МПа в целиках между отработанной камерой 2 блока Южный-1 и прилегающими камерами 1 блоков Южный-1 и Южный-2 (рисунок 3.2.8). Высокие значения обусловлены шириной рудно-породной «корки» между блоками менее 5 м.

На гор. –406 м наблюдается похожая ситуация. Высокие значения горизонтальных напряжений σ_y между камерой 1 блока Южный-2 и камерой 2 блока Южный-1 составляют 95 МПа (рисунок 3.2.9).

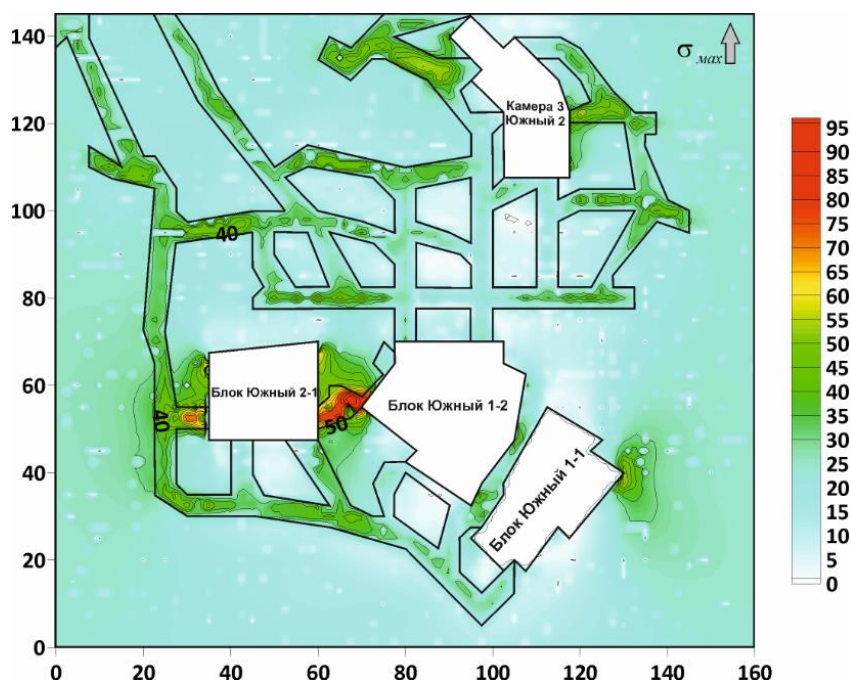


Рисунок 3.2.9 – Распределение горизонтальных напряжений σ_y в южной части рудной залежи «Восток-1» после отработки камеры 2 блока «Южный-1» в проекции на гор. –406 м

Высокий уровень напряжений установлен после полной отработки блоков 40 и 45. Удароопасность этих блоков подтверждается результатами сейсмоакустического мониторинга. Они расположены на пересечении с тектонически-активным разломом ТН-3 и в зоне опорного давления Южных камер. Поэтому процесс их моделирования осуществлялся с учётом последовательной отработки на каждом горизонте.

После отработки блока 40 на гор. –390 м концентрация горизонтальных напряжений σ_x достигает 88 МПа в кровле штрека, расположенного в зоне опорного давления камеры 3 блока Южный-2 (рисунок 3.2.10).

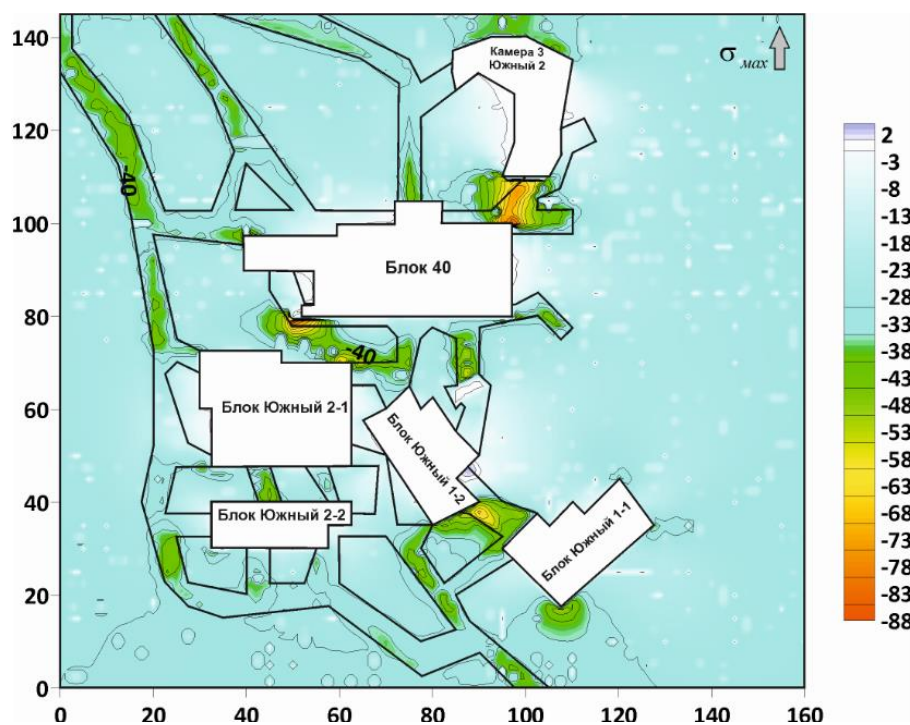


Рисунок 3.2.10 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x в южной части рудной залежи «Восток-1» после отработки блока 40 в проекции на гор. –390 м

Максимальные значения горизонтальных напряжений $\sigma_y = 135$ МПа на гор. – 390 м наблюдаются между камерами 1 и 2 блока Южный-1 (рисунок 3.2.11).

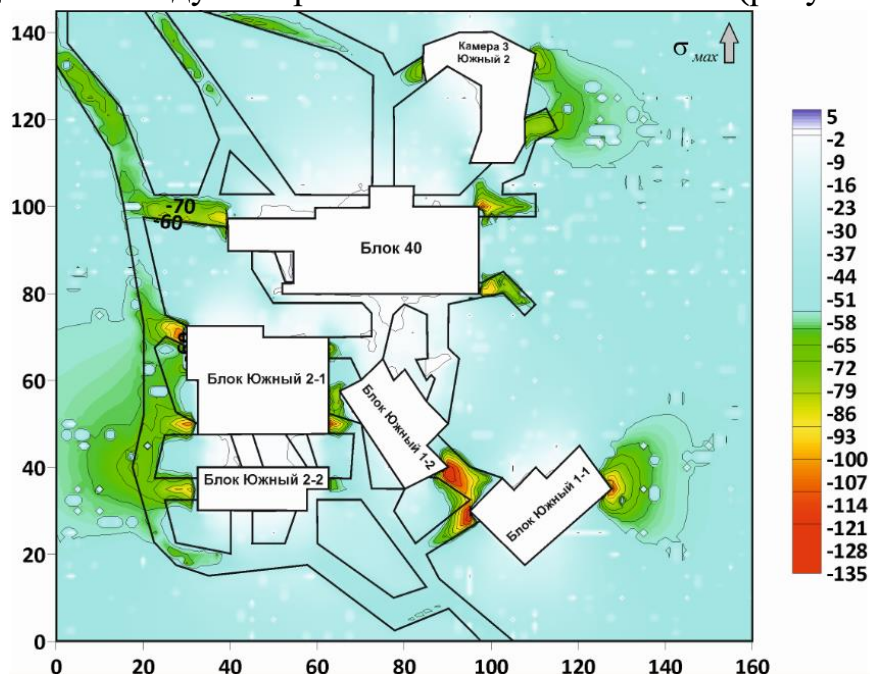


Рисунок 3.2.11 – Распределение горизонтальных напряжений σ_y в южной части рудной залежи «Восток-1» после отработки блока 40 в проекции на гор. –390 м

После отработки гор. –406 м максимальные горизонтальные напряжения σ_y составляют 115 МПа в кровле выработок, также расположенных в зоне опорного давления очистных блоков (рисунок 3.2.12).

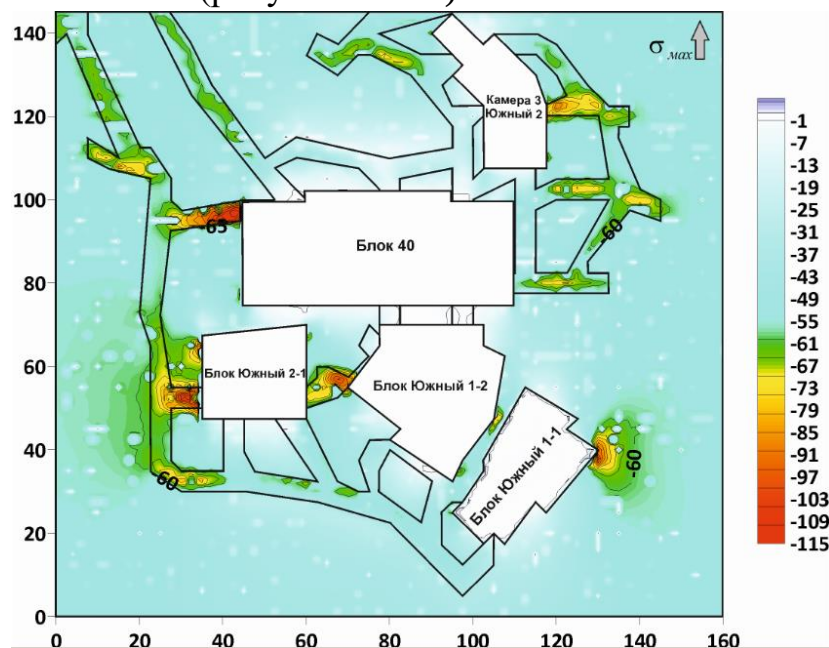


Рисунок 3.2.12 – Распределение горизонтальных напряжений σ_y в южной части рудной залежи «Восток-1» после отработки блока 40 в проекции на гор. –406 м

Наибольшее увеличение концентрации напряжений наблюдается в кровле штреков на гор. –420 м после полной отработки блока 40 (рисунок 3.2.13).

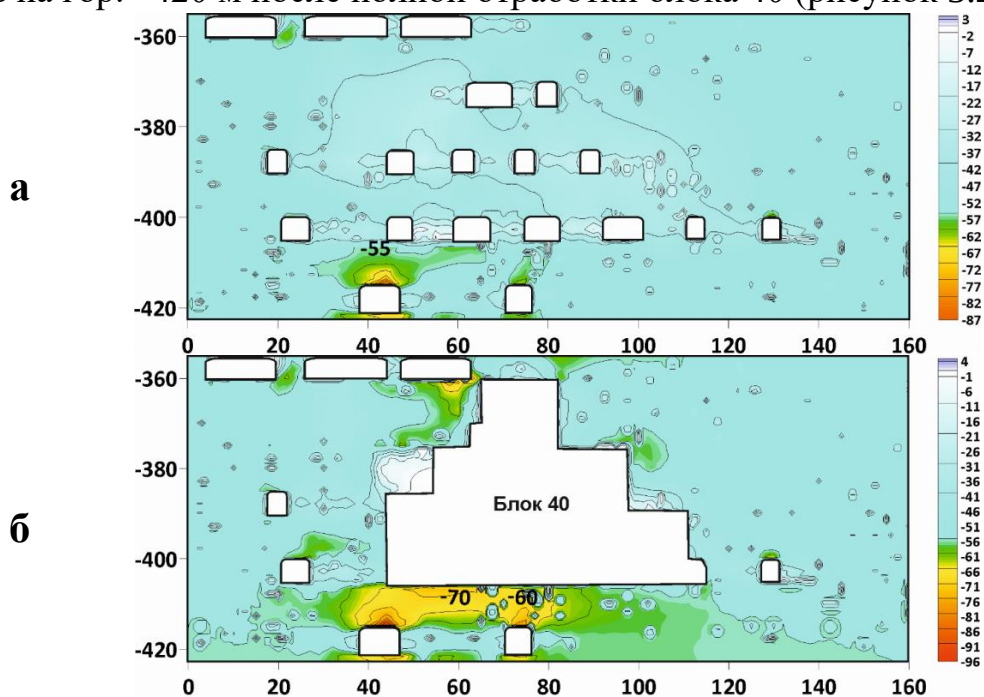


Рисунок 3.2.13 – Распределение горизонтальных напряжений σ_y в проекции на разрез 39 рудной залежи «Восток-1» до (а) и после (б) отработки блока 40

Полная очистная выемка приводит к перераспределению напряжений и их максимальной концентрации в кровле штреков на гор. –420 м после отработки блока 40. По результатам расчетов установлено увеличение концентрации горизонтальных напряжений в кровле штреков после полной отработки блока 40 на 18 % – с 87 до 103 МПа (рисунок 3.2.13, 3.2.14). При этом наибольшие значения на гор. –420 м отмечаются в кровле выработок, расположенных в зонах опорного давления отработанных блоков (рисунок 3.2.14).

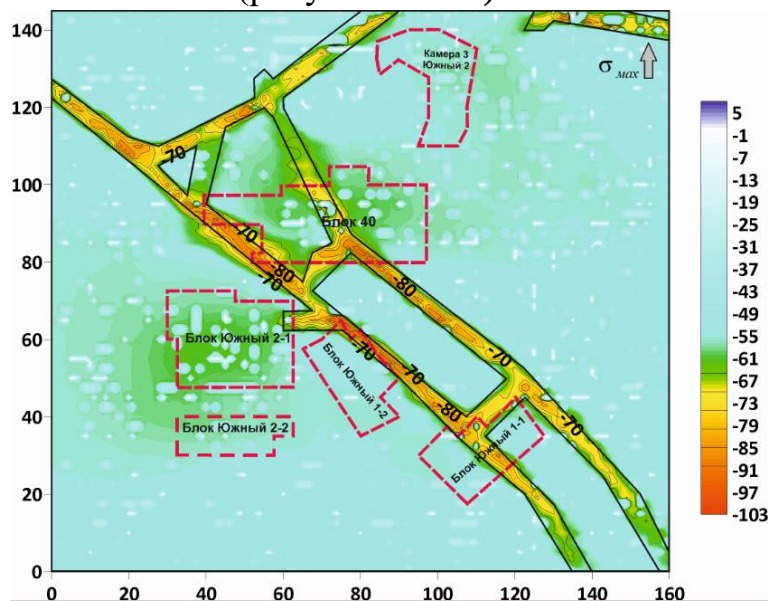


Рисунок 3.2.14 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x в кровле штреков, расположенных на гор. –420 м после полной отработки всех блоков «Южный-1», «Южный-2» и блока 40.

Распределение напряжений при отработке блока 45 имеет схожий характер в сравнении с блоком 40. На гор. –406 м выявлены высокие напряжения (108 МПа) в кровле штреков, прилегающих к блоку 45 (рисунок 3.2.15).

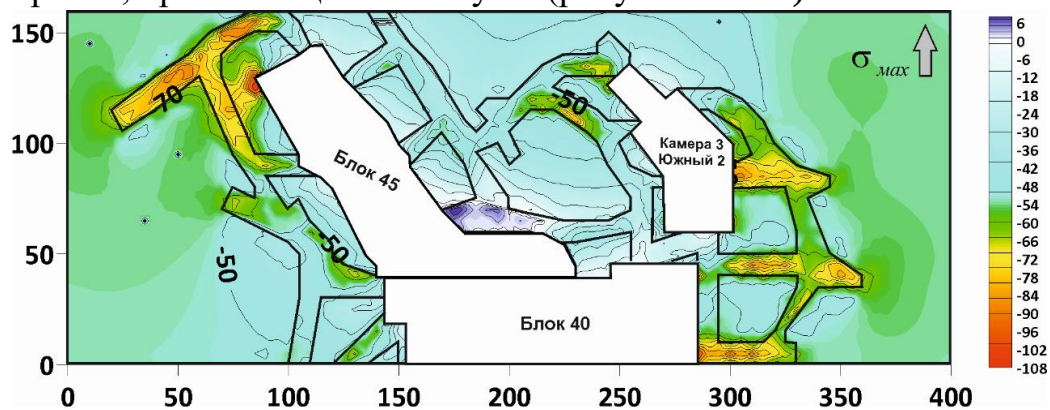


Рисунок 3.2.15 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x в рудной залежи «Восток-1» после полной отработки блока 40 и 45 в проекции на гор. –406 м

После отработки блока 45 на гор. –420 м уровень горизонтальных напряжений σ_y в кровле штреков достигает максимальных значений 104 МПа. Самые высокие значения отмечаются в кровле выработок, расположенных в зонах опорного давления блока 40 и 45 (рисунок 3.2.16).

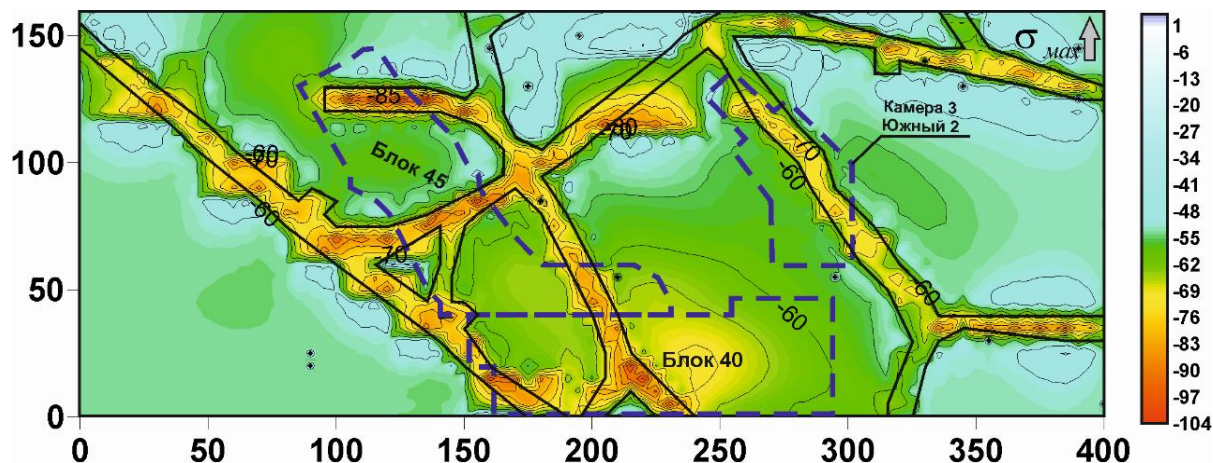


Рисунок 3.2.16 – Распределение горизонтальных напряжений σ_y в кровле штреков, расположенных на гор. –420 м после полной отработки блоков 40 и 45

Полученные результаты математического моделирования использованы для разработки и обоснования параметров разгрузочных мероприятий, приведенных в подразделе 4.2, которые внедрены в «Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях Николаевское и Южное (АО «ГМК «Дальполиметалл»), опасных по горным ударам (2018 г.) [126].

3.3 Оценка влияния структурно-геологических особенностей на напряженно-деформированное состояние разрабатываемого массива горных пород

В процессе моделирования участка рудной залежи «Восток-1», характеризующегося повышенной степенью удароопасности, необходимо не только учитывать условия его залегания в районе тектонически активного разлома ТН-3, но и морфологию контура олистолита известняков, являющегося одним из определяющих удароопасность факторов [116, 148].

Объектом моделирования был выбран участок рудной залежи «Восток-1» в районе отработанных камер 1–2 блока Южный-1, камер 1–3 блока Южный-2, а

также блоков 40 и 45. Расчеты осуществлялись на примере ведения горных работ на гор. –390 м. Расчетная схема моделирования представлена на рисунке 3.3.1.

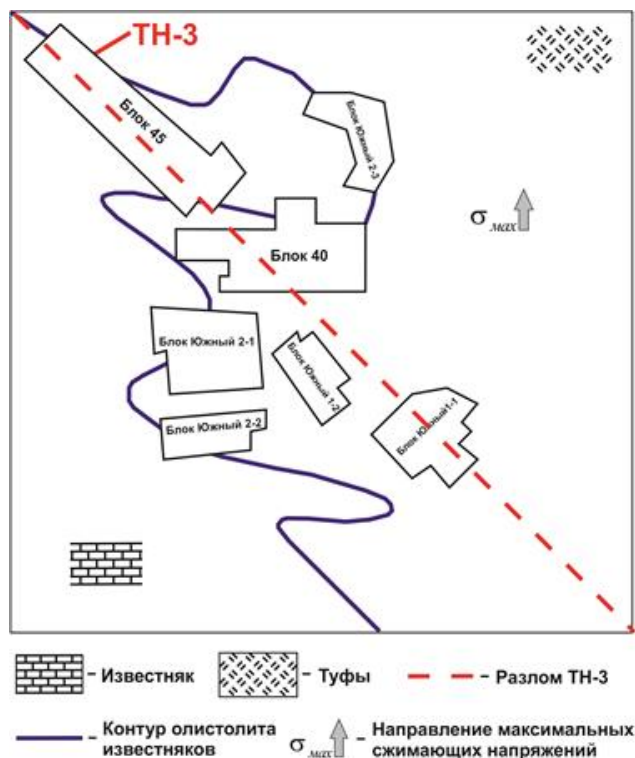


Рисунок 3.3.1 – Расчетная схема моделирования полей напряжений на гор. –390 м рудной залежи «Восток-1»

Моделировали восемь этапов отработки:

0. До начала отработки камер (учитывался только контур олистолита известняков и разлом ТН-3);
1. После отработки камеры 1 блока Южный-2;
2. После отработки камеры 1 блока Южный-1;
3. После отработки камеры 2 блока Южный-2;
4. После отработки камеры 3 блока Южный-2;
5. После отработки камеры 2 блока Южный-1 (до начала отработки блока 40);
6. После полной отработки блока 40;
7. После полной отработки блока 45.

По результатам расчетов до начала отработки камер наибольшие концентрации сжимающих напряжений, но не превышающие предельно допустимых значений (82 и 102 МПа, рисунок 3.3.2), наблюдаются вдоль

тектонически активного разлома ТН-3. Также стоит отметить, что концентрации напряжений с восточной стороны контура олистолита известняков заметно выше, чем с запада (рисунок 3.3.2).

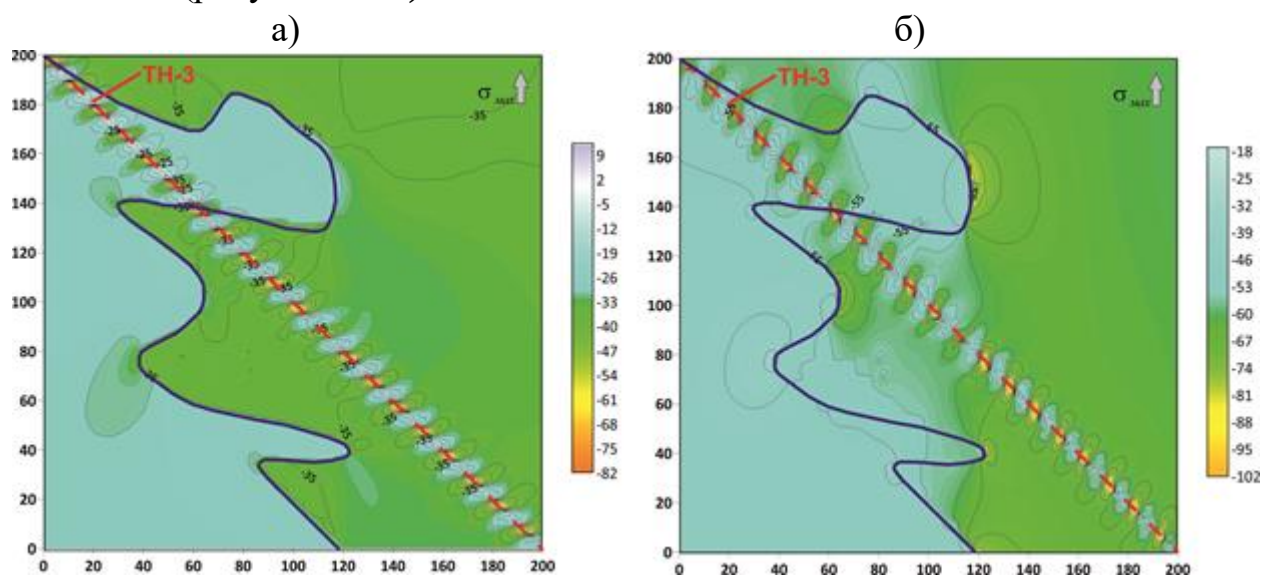


Рисунок 3.3.2 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x (а) и σ_y (б) в проекции на гор. –390 м до начала отработки камер р.з. «Восток-1»

На первом этапе отработки гор. –390 м наиболее высокая интенсивность напряжений наблюдается в краевых частях камеры 1 блока Южный-2 (рисунок 3.3.3). Максимальные горизонтальные сжимающие напряжения: $\sigma_x = 108$ МПа; $\sigma_y = 287$ МПа.

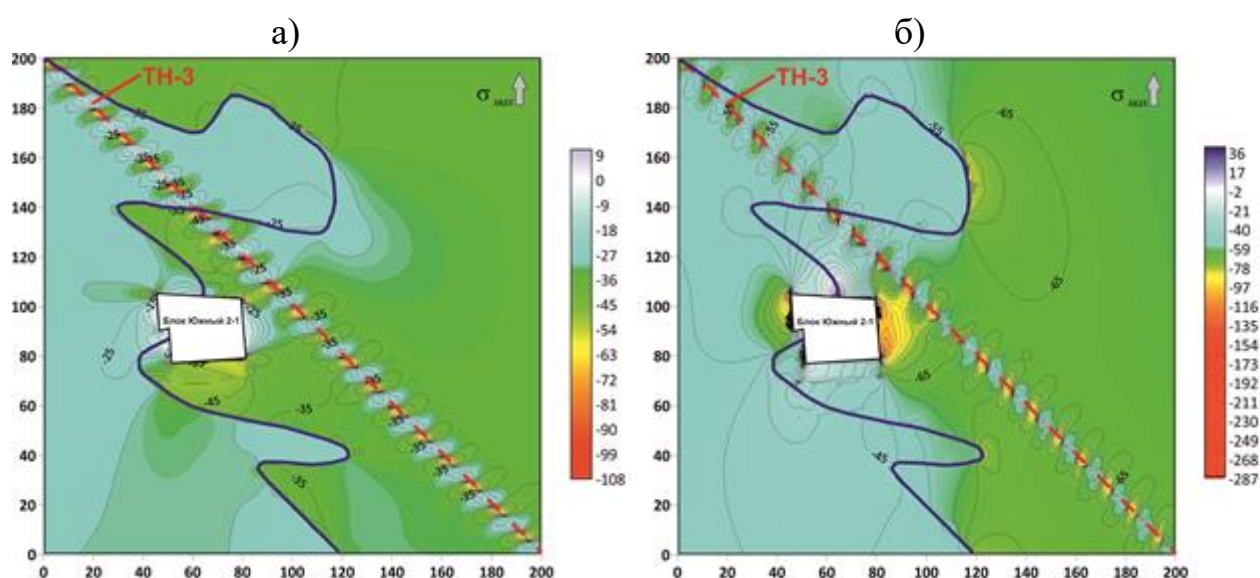


Рисунок 3.3.3 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x (а) и σ_y (б) в проекции на гор. –390 м после отработки камеры 1 блока Южный-2

На втором, третьем и четвертом этапах отработки (камера 1 Южный-1, камеры 2, 3 Южный-2) ситуация качественно не меняется. По-прежнему высокие концентрации напряжений наблюдаются только в краевых частях отработанных камер (рисунок 3.3.4).

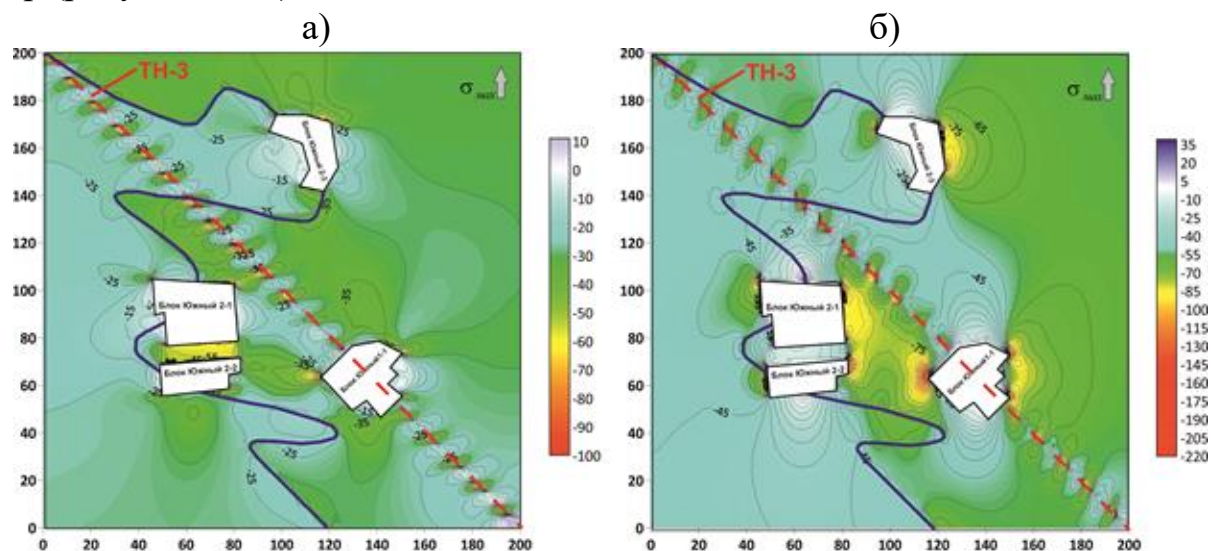


Рисунок 3.3.4 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x (а) и σ_y (б) в проекции на гор. –390 м после отработки камеры 3 блока Южный-2

После полной отработки камеры 2 блока Южный-1 возникает концентрация сжимающих напряжений σ_y в целиках между камерой 2 блока Южный-1 и камерами 1 блоков Южный-1 и Южный-2 (рисунок 3.3.5). Ширина рудно-породной «корки» менее 5 м обуславливает наличие высоких концентраций, что впоследствии приводит к их саморазрушению. Величина максимальных горизонтальных напряжений σ_y достигает 236 МПа.

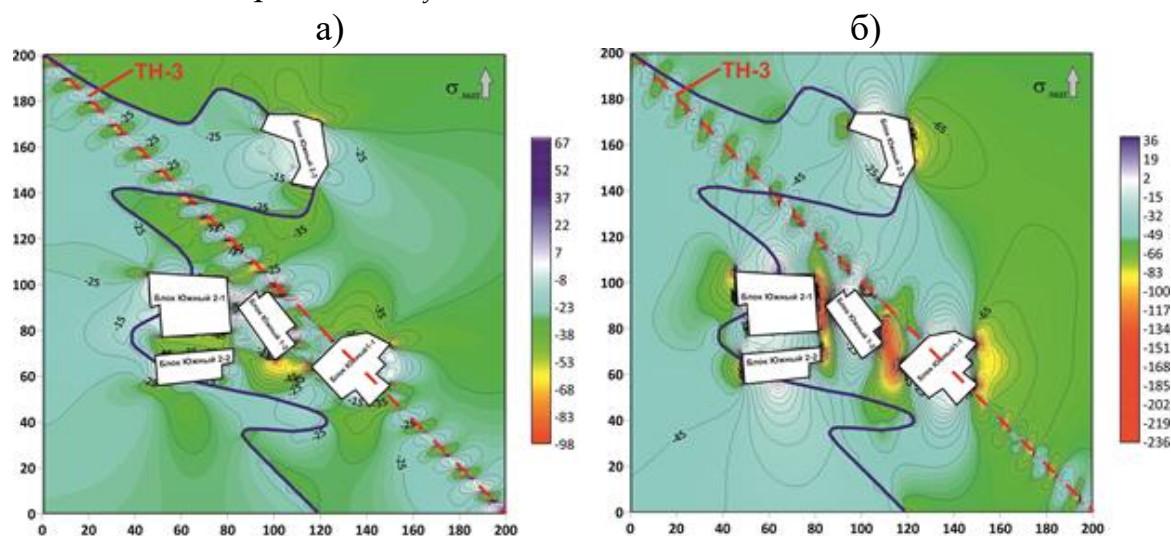


Рисунок 3.3.5 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x (а) и σ_y (б) в проекции на гор. –390 м после отработки камеры 2 блока Южный-1

Сложная геомеханическая ситуация наблюдалась в районе блока 40 и между камерами блоков Южный 1-1 и Южный 1-2 еще до отработки блока 45, расположенного на севере рудной залежи «Восток-1» (рисунок 3.3.6).

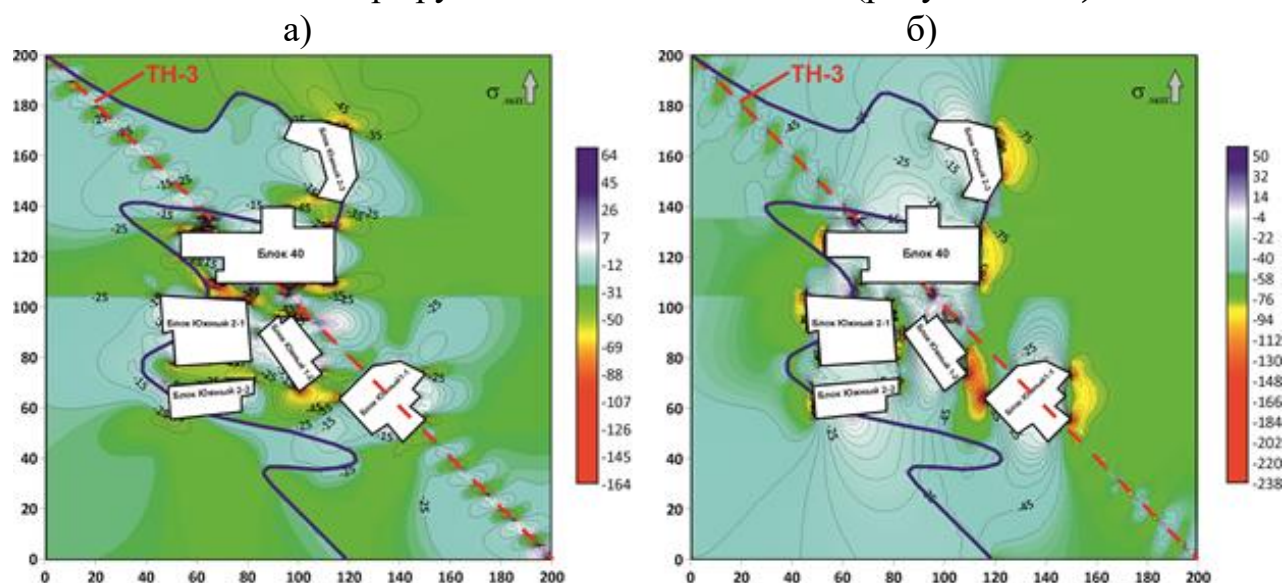


Рисунок 3.3.6 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x (а) и σ_y (б) в проекции на гор. –390 м после полной отработки блока 40

Наблюдается резкое увеличение горизонтальных сжимающих напряжений σ_x и растягивающих напряжений σ_y . Рост интенсивности напряжений объясняется расположением протяженного участка контура блока 40 на пересечении с разломом ТН-3 (рисунок 3.3.6)

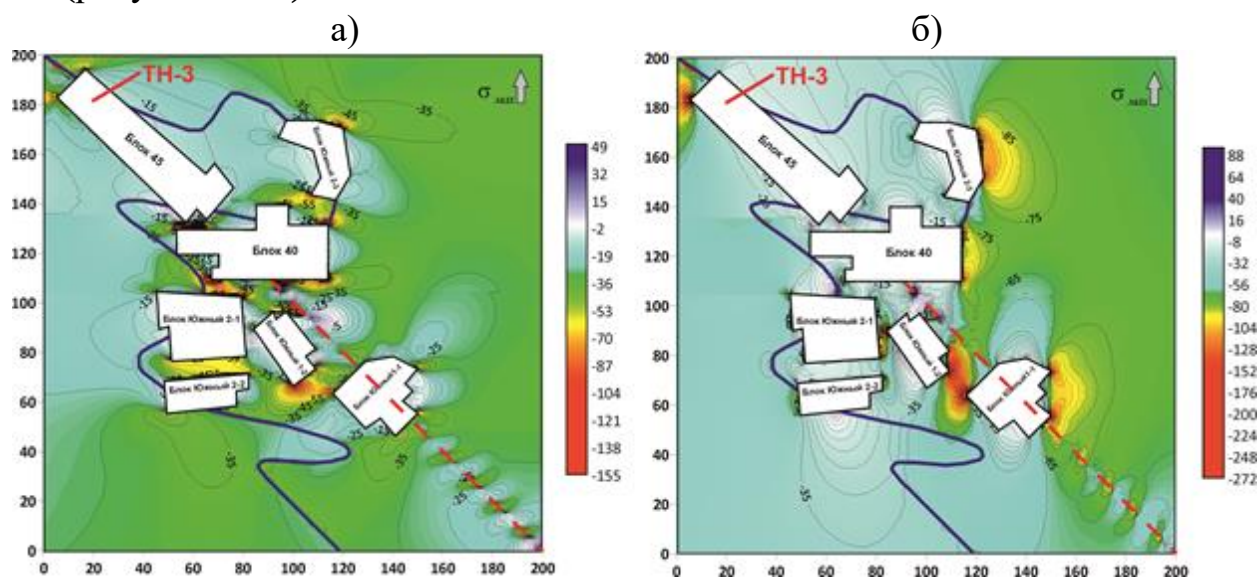


Рисунок 3.3.7 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x (а) и σ_y (б) в проекции на гор. –390 м после полной отработки блока 45

Последовательная выемка блока 45 на гор. –390 м, по результатам расчетов, приводит к резкому увеличению сжимающих и растягивающих напряжений, преимущественно на участках между очистными камерами. Максимальный рост наблюдается вокруг очистного блока 40, что объясняется пространственным расположением данного блока в зоне опорного давления отработанных камер и пересечением с разломом ТН-3 (рисунок 3.3.7).

В целом полученные результаты моделирования дают основание для обобщающего вывода: помимо современной глубинной архитектуры на уровень и характер распределения напряжений оказывает влияние расположение очистных камер относительно активного крутопадающего разлома ТН-3 [116, 148].

Получен также ряд других частных результатов: повышенные значения сжимающих напряжений (до 215 МПа) наблюдаются лишь в районе отработанного блока 40 (рисунок 3.3.8а, 3.3.9а), расположенного на пересечении с разломом ТН-3; в районе отработанной камеры 1 блока «Южный-1» (рисунок 3.3.8б, 3.3.9б) и блока 45 концентраций сжимающих напряжений на пересечении с разломом ТН-3 не обнаружено.

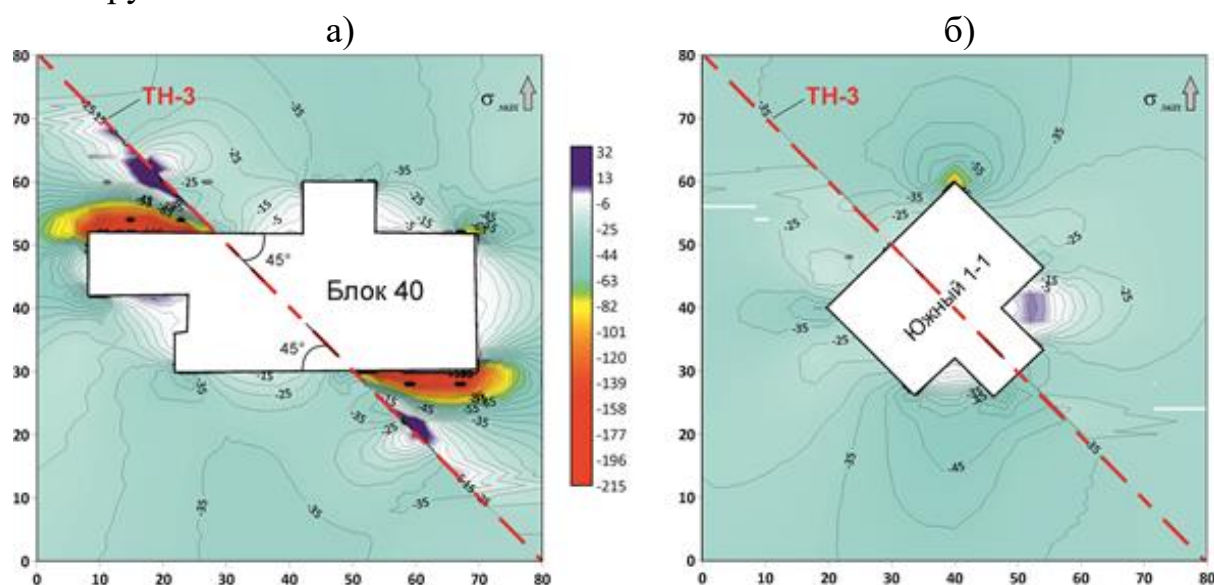


Рисунок 3.3.8 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x в проекции на гор. –390 м (а – в районе отработки блока 40, б – в районе отработки камеры 1 блока Южный-1)

Существенные различия в величине и распределении полей напряжений вокруг блока 40 и камеры 1 блока «Южный-1» объясняются расположением камер по отношению к разлому ТН-3.

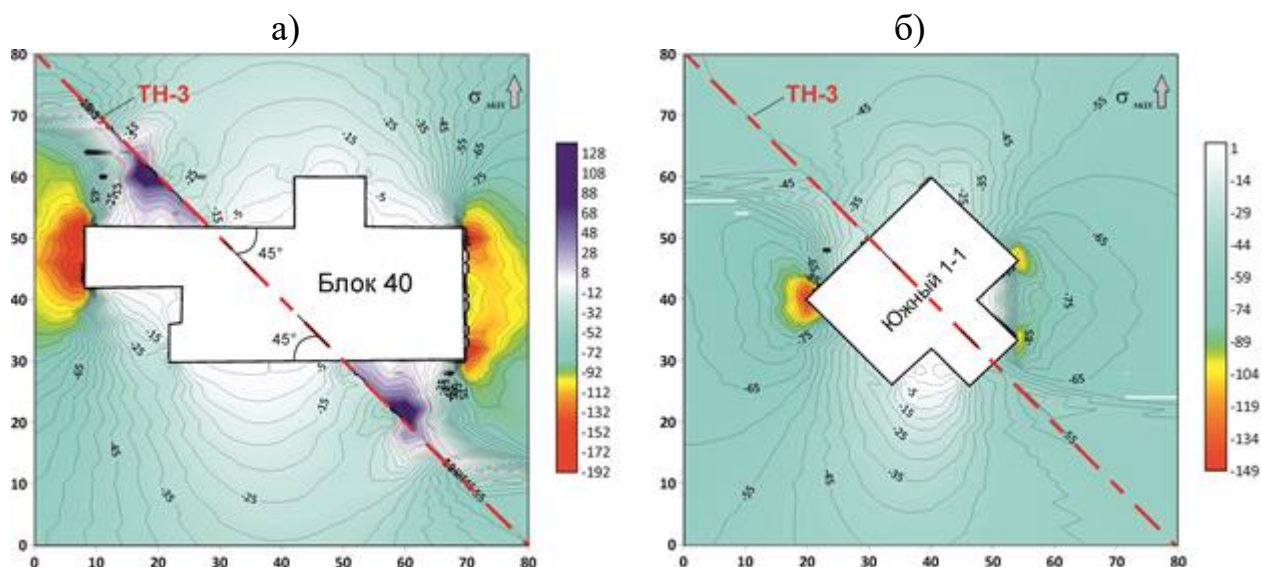


Рисунок 3.3.9 – Распределение горизонтальных напряжений σ_y в проекции на гор. –390 м (а – в районе отработки блока 40, б – в районе отработки камеры 1 блока «Южный-1»)

Контуры камеры 1 блока Южный 1 расположены под углом 90° по отношению к разлому ТН-3, контуры блока 40 – под углом 45° (рисунок 3.3.8 и 3.3.9). Сжимающие напряжения превышают предельно допустимые значения при расположении блока относительно ТН-3 таким образом, когда между контуром очистного пространства и границей нарушения формируется острый угол (рисунок 3.3.8а, 3.3.9а). Данный установленный факт необходимо учитывать при разработке технологических решений и комплекса профилактических мероприятий при ведении горных работ в сложных структурно-геологических условиях.

Для оценки качественного влияния контура олистолита известняков на распределение полей напряжений дополнительно промоделирована расчетная схема участка массива Николаевского месторождения, вмещающими породами которого являются только известняки. Для более наглядной интерпретации и анализа данных рассчитывалась разность напряжений между расчетными схемами с учетом и без учета влияния контура олистолита известняков. Результаты распределения горизонтальных напряжений в двух типах расчетных схем представлены на рисунок 3.3.10.

Результаты моделирования указывают на весьма существенное влияние фактора морфологии крупной пластины вмещающих известняков: распределение напряжений происходит таким образом, что с юго-восточной стороны всякого

бока олистолита напряжения выше на 30 МПа, а максимальные концентрации напряжений наблюдаются на участках крутообразных поднятий поверхности его тела (рисунок 3.3.10).

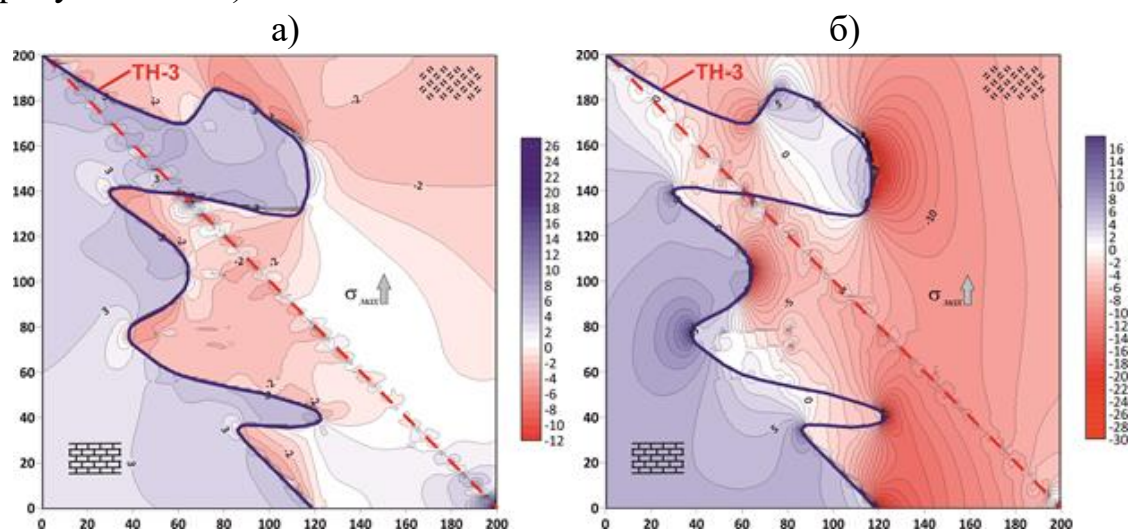


Рисунок 3.3.10 – Разница в распределении горизонтальных напряжений σ_x (а) и σ_y (б) при моделировании с учетом и без учета влияния контура олистолита известняков в проекции на гор. –390 м

Таким образом, одним из важных результатов математического моделирования является установленная научная позиция о принципиальном изменении полей напряжений массива месторождения вследствие влияния морфологии контура олистолита, что безусловно необходимо учитывать при ведении горных работ и разработке комплекса профилактических мероприятий.

3.4 Определение напряженного состояния конструктивных элементов систем разработки на глубоких горизонтах месторождения

Результаты проведенного моделирования НДС массива пород нижней части Николаевского месторождения (см. подразделы 3.2 и 3.3) позволили выявить следующие особенности поля напряжений:

- в кровле выработок, расположенных непосредственно под очистными блоками (в особенности перпендикулярно действию главных сжимающих напряжений) установлено превышение предельно допустимых значений концентраций горизонтальных сжимающих напряжений;

– повышенный уровень сжимающих напряжений наблюдается на участках массива в случае образования острого угла на пересечении контуров очистной камеры с разломом ТН-3.

Выявленные особенности требуют изучения, формируемого в районе очистных блоков поля напряжений, включая их перераспределение напряжений в процессе проходки горно-подготовительных и нарезных выработок и участков сопряжений. Расчеты выполнялись для глубин горных работ 600, 700, 800 и 900 м.

1. *Определение закономерности распределения максимальных сжимающих напряжений в кровле штрека, расположенного под очистной камерой, в зависимости от направления главных сжимающих напряжений.*

На рисунке 3.4.1 представлена расчетная схема для моделирования полей напряжений в надштрековом целике при различных вариантах расположения штрека по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений

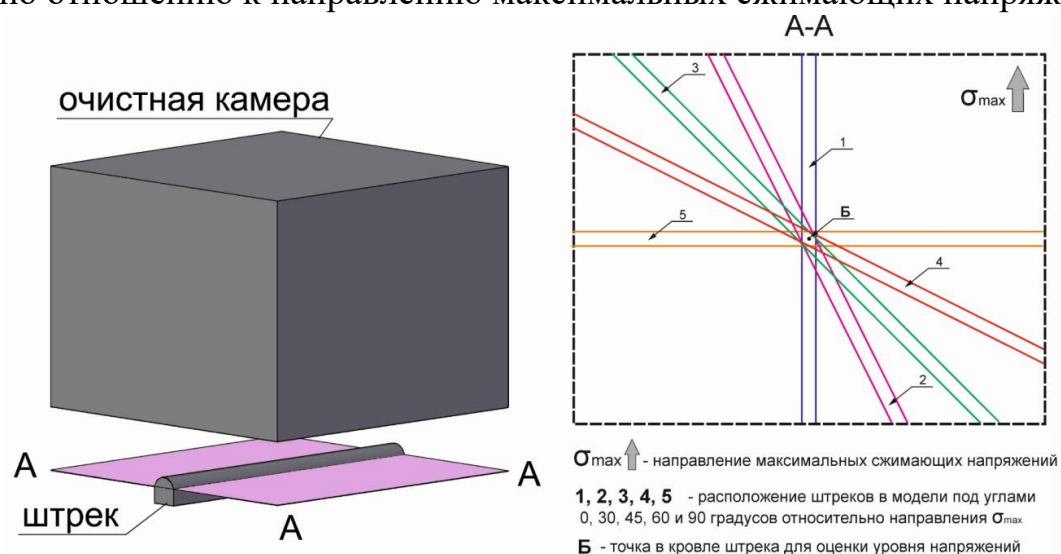


Рисунок 3.4.1 – Расчетная схема моделирования полей напряжений в надштрековом целике при различных вариантах положения штрека по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений

Рассчитано 5 моделей различных вариантов положения штрека, расположенного под очистным пространством, по отношению к направлению действия максимальных сжимающих напряжений σ_{max} (рисунок 3.4.1):

- параллельно максимальным сжимающим напряжениям σ_{max} ;

- под углом 30° к максимальным сжимающим напряжениям σ_{max}
- под углом 45° к максимальным сжимающим напряжениям σ_{max} ;
- под углом 60° к максимальным сжимающим напряжениям σ_{max} ;
- перпендикулярно максимальным сжимающим напряжениям σ_{max} .

Результаты объемного моделирования позволили выявить особенности напряженного состояния кровли штрека, расположенного под выработанным пространством очистной камеры, в зависимости от различных направлений главных сжимающих напряжений σ_{max} и глубины отработки.

Анализ результатов моделирования подтвердил увеличение концентраций максимальных сжимающих напряжений σ_y в надштрековом целике при расположении выработки перпендикулярно действию главных сжимающих напряжений [113, 114].

На рисунке 3.4.2 представлено распределение интенсивности касательных напряжений $\tau_{инт}$ (а, б) и горизонтальных напряжений σ_y (в, г) при расположении штрека параллельно (а, в) и перпендикулярно (б, г) действию максимальных сжимающих напряжений.

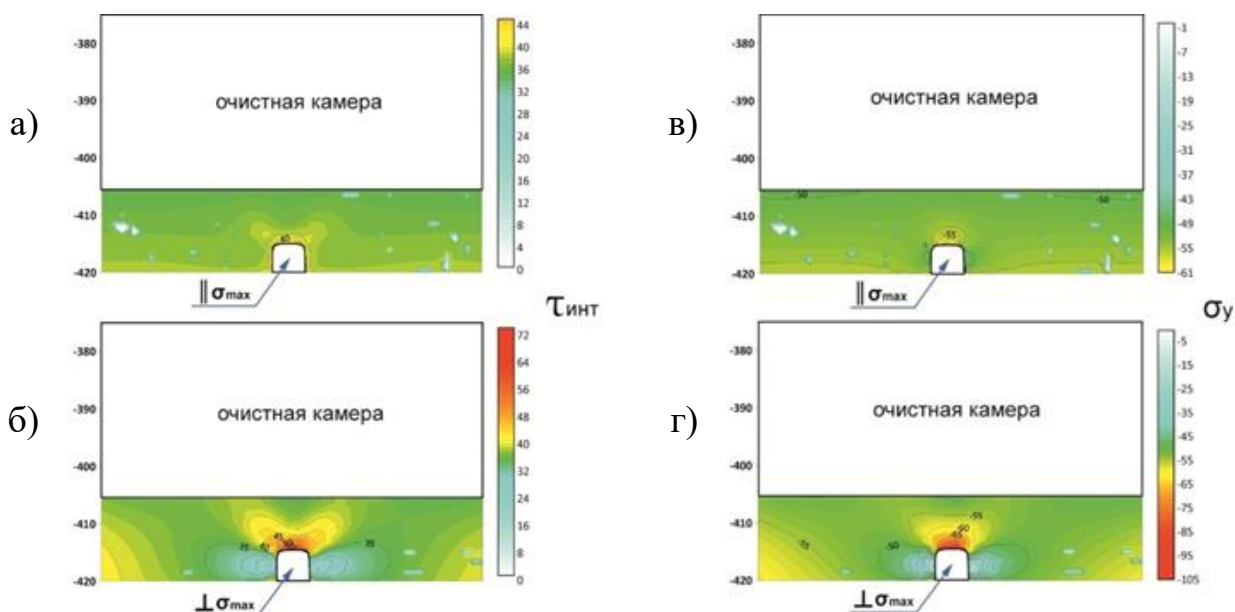


Рисунок 3.4.2 – Распределение интенсивности касательных $\tau_{инт}$ (а, б) и горизонтальных напряжений σ_y (в, г) при расположении штрека на гор. –420 м параллельно (а, в) и перпендикулярно (б, г) действию максимальных сжимающих напряжений

В случае расположения штрека параллельно действию максимальных сжимающих напряжений касательные напряжения не превышают 44 МПа (рисунок

3.4.2а), горизонтальные σ_y – 61 МПа (рисунок 3.4.2в). В случае перпендикулярного расположения штрека горизонтальные напряжения σ_y достигают высоких значений в 105 МПа (рисунок 3.4.2г), касательные – 72 МПа (рисунок 3.4.2б).

На рисунке 3.4.3 представлены графики распределения максимальных сжимающих напряжений σ_y в кровле штрека, расположенного под очистной камерой, в зависимости от направления главных сжимающих напряжений при различной глубине отработки.

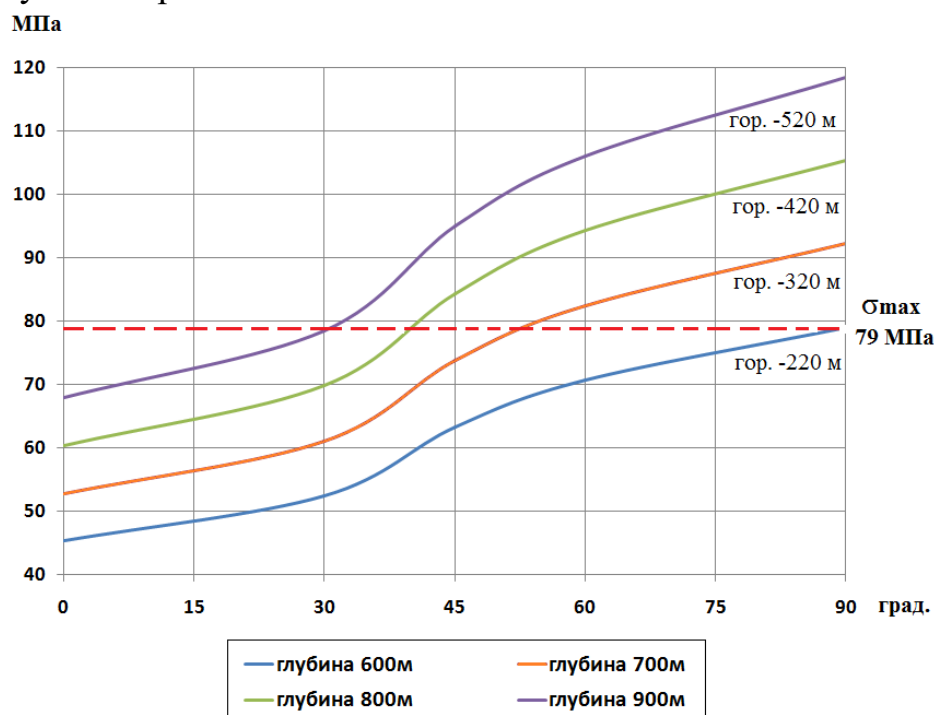


Рисунок 3.4.3 – Графики распределения значений максимальных сжимающих напряжений σ_y в кровле штрека в зависимости от угла его расположения по отношению к направлению главных напряжений при различной глубине

Установлено, что при отработке выше гор. –220 м (глубина 600 м) уровень действующих напряжений не превышает предельно допустимых значений (79 МПа) при любом возможном расположении штрека относительно направления действия $\sigma_{\max}$. Максимальные концентрации напряжений наблюдаются при увеличении глубины и расположении штрека перпендикулярно направлению действия $\sigma_{\max}$ (рисунок 3.4.3).

Рассчитанные значения максимальных сжимающих напряжений σ_y в кровле штрека в зависимости от угла его расположения по отношению к направлению главных напряжений на различной глубине были аппроксимированы в среде Mathlab с помощью функции вида:

$$Fu(C, x, y) = C_1 + C_2 * y - (C_3 + C_4 * y) * \cos\left(\frac{x * \pi}{90}\right), \quad (3.3)$$

где x – угол между выработкой и направлением максимальных сжимающих напряжений, град;

y – горизонт (отметка по оси z), на котором расположена выработка, м;

C_1, C_2, C_3 и C_4 – коэффициенты.

Средняя ошибка аппроксимации функции в абсолютном эквиваленте составила 1,2 МПа.

$$\sigma_{max} = 39,30872 - 0,103444 * z - (10,864202 + 0,02859 * z) * \cos\left(\frac{\alpha * \pi}{90}\right), \quad (3.4)$$

где σ_{max} – максимальные сжимающие напряжения в кровле выработки, Мпа;

z – горизонт расположения выработки, м;

α – угол между выработкой и направлением максимальных сжимающих напряжений, град.

Полученная закономерность использована в дальнейшем (раздел 4) для обоснования параметров бурения разгрузочных скважин и дополнительных мер безопасности при проведении горно-подготовительных и нарезных выработок на подэтажах перед началом отработки очистных блоков на глубинах более 800 м, ниже гор. –420 м [71].

2. Определение закономерности распределения максимальных сжимающих напряжений на сопряжении контуров очистной камеры с разломом ТН-3

Для оценки степени влияния тектонически активного разлома ТН-3 на формирование природно-техногенного поля напряжений в массиве промоделированы различные варианты положения очистной камеры по отношению к разлому ТН-3 (рисунок 3.4.4):

- перпендикулярно разлому ТН-3;
- под углом 63° к разлому ТН-3;
- под углом 45° к разлому ТН-3;
- под углом 27° к разлому ТН-3;
- под углом 18° к разлому ТН-3.

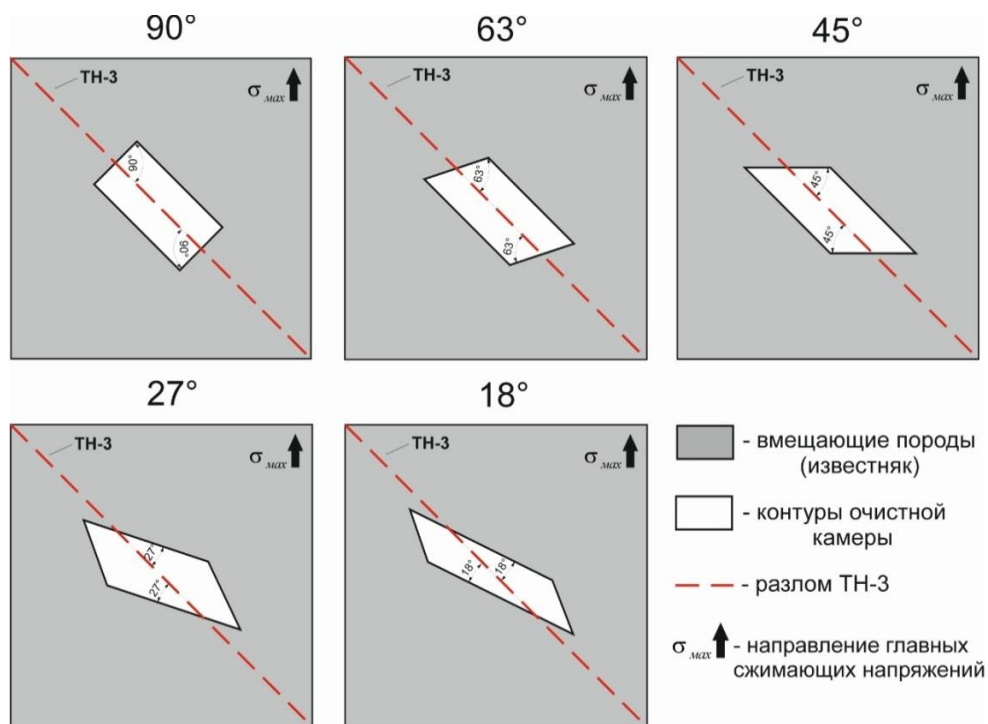


Рисунок 3.4.4 – Расчетная схема моделирования полей напряжений при различных вариантах положения очистной камеры по отношению к разлому ТН-3

Анализ результатов моделирования показал наличие высоких концентраций сжимающих и растягивающих напряжений на пересечениях очистной камеры с разломом ТН-3 [148].

На рисунках 3.4.5 и 3.4.6 представлены примеры распределения горизонтальных напряжений σ_x и σ_y при отработке камеры, пересекающей разлом ТН-3 под углами 90° и 45° , соответственно.

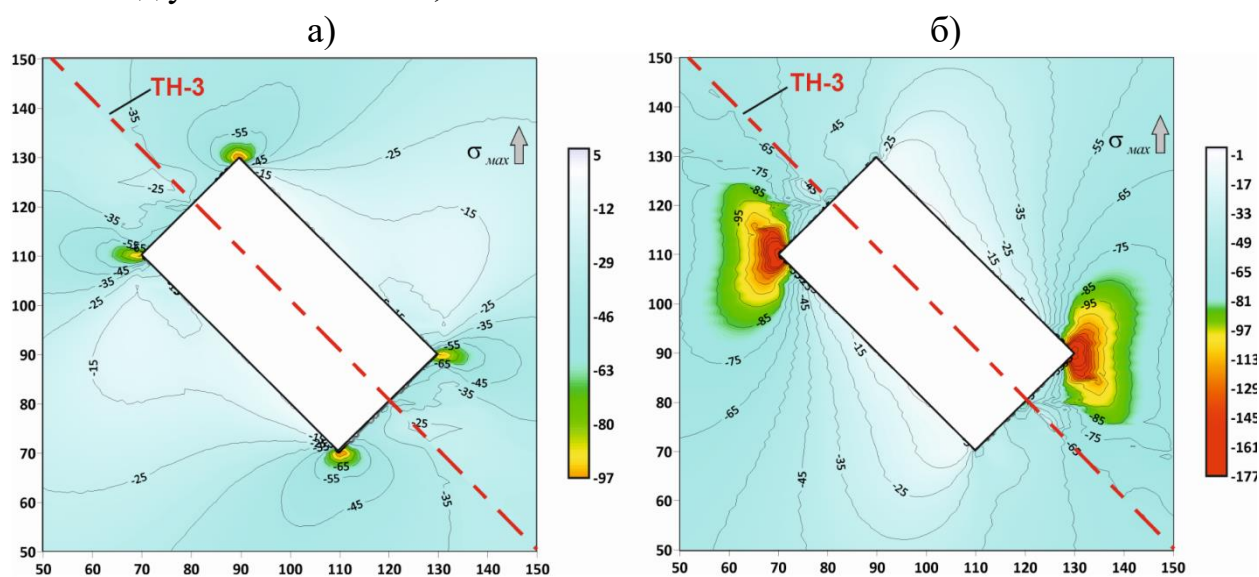


Рисунок 3.4.5 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x и σ_y в проекции на гор. –390 м при отработке камеры, пересекающей разлом ТН-3 под углом 90°

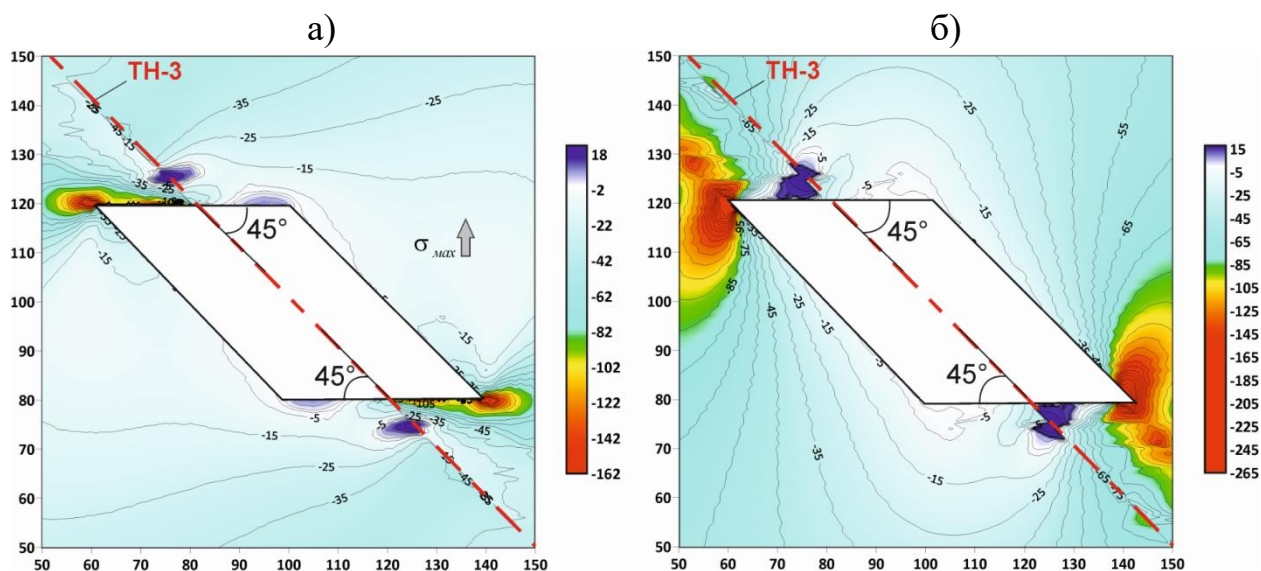


Рисунок 3.4.6 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x и σ_y в проекции на гор. –390 м при отработке камеры, пересекающей разлом ТН-3 под углом 45°

Разработка и расчет моделей при различном расположении камеры относительно тектонического нарушения ТН-3 позволили установить зависимость распределения максимальных сжимающих напряжений σ_x и растягивающих напряжений σ_y от угла, формирующегося между очистной камерой и разломом ТН-3 (рисунок 3.4.7).

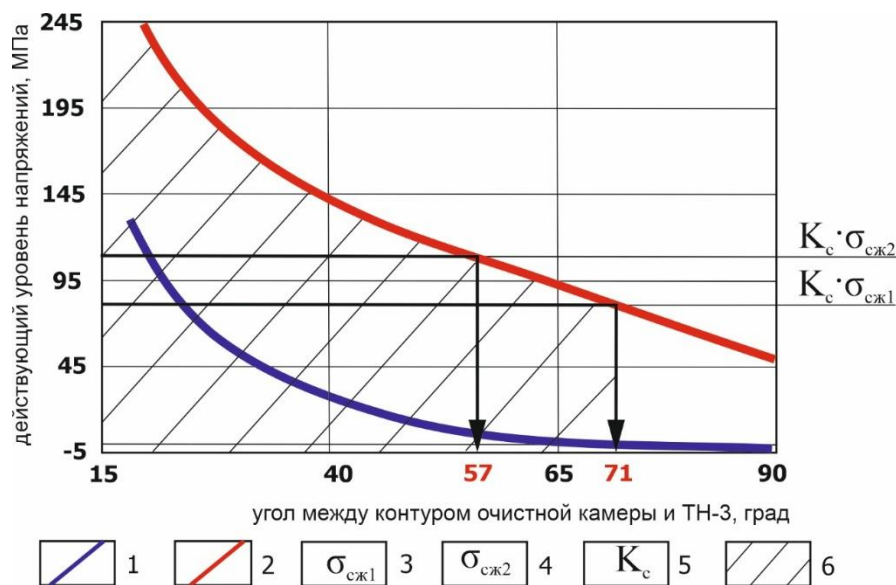


Рисунок 3.4.7 – График действующих максимальных напряжений в целике в зависимости от величины угла, формируемого между очистной камерой и разломом ТН-3

1 – уровень максимальных растягивающих напряжений σ_y , МПа; 2 – уровень максимальных сжимающих напряжений σ_x , МПа; 3 – предел прочности на сжатие массива известняка, МПа; 4 – предел прочности на сжатие геденбергитового скарна, МПа; 5 – коэффициент структурного ослабления; 6 – область удароопасности целика

По результатам математического моделирования установлена зависимость распределения значений максимальных сжимающих напряжений σ_x и растягивающих напряжений σ_y от угла, формирующегося между очистной камерой и разломом ТН-3 (рисунок 3.4.7).

Анализ полученных данных показал: чем меньше угол, сформированный между контурами очистной камеры и разломом ТН-3, тем выше концентрация сжимающих и растягивающих напряжений. При расположении очистной камеры под углом менее $57-71^\circ$ (в зависимости от типа пород) к тектонически активному разлому ТН-3 (в зависимости от типа пород) концентрация сжимающих напряжений на пересечении с разломом ТН-3 превышает предельно допустимое значение предела прочности на сжатие (рисунок 3.4.7).

Представленная выше закономерность влияния разломной зоны ТН-3 на напряженное состояние разрабатываемого массива горных пород Николаевского месторождения имеет также практическое значение и использована для предварительной оценки потенциальной удароопасности отработываемых блоков до начала их отработки, а также для обоснования дополнительных мер геомеханической безопасности при отработке очистных блоков на пересечении с разломом ТН-3, внесенных в указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях Николаевское и Южное (АО «ГМК «Дальполиметалл»), опасных по горным ударам (2018 г.) [126].

Выводы по главе 3:

1. По результатам численного моделирования НДС рудных залежей «Восток-1» и «Харьковская» в процессе их отработки установлены высокие концентрации горизонтальных сжимающих напряжений в краевых частях камер, межблоковых целиках и кровле горных выработок, расположенных в зоне опорного давления отработанных блоков.

2. Наиболее высокие концентрации горизонтальных сжимающих напряжений (до 112 МПа) отмечены в кровле штреков, расположенных перпендикулярно действию максимальных сжимающих напряжений, в зоне

опорного давления очистных блоков, отработанных на вышележащих горизонтах; уровень напряжений в надштрековых целиках превышает предельно допустимые значения (79 МПа) при расположении горных выработок на глубинах более 600 м (ниже гор. –220 м).

3. Включение в модель элементов тектонической структуры оказывает значительное влияние на НДС в участках пересечения очистными выработками активного крутопадающего разлома ТН-3, и в целом наличие разломных структур приводит к увеличению концентраций сжимающих напряжений при пересечении их выработанным пространством.

4. Качественные изменения полей напряжений возникают вследствие включения в модель реальной морфологии контура крупной пластины олистолита известняков; перераспределение напряжений таково, что с юго-восточной стороны висячего бока тела олистолита напряжения выше на 30 МПа (на 25 %), а максимальные концентрации напряжений (до 155 МПа) характерны для участков крутообразных поднятий его поверхности.

5. Наиболее удароопасными конструктивными элементами камерной системы разработки с управляемым обрушением кровли объективно являются целики на контакте с тектоническим нарушением ТН-3, напряжения в которых могут превышать предел прочности пород на сжатие (108 МПа) более чем в 2 раза; их отработку необходимо производить при углах пересечения тектонических нарушений контурами очистных камер менее 57-71°.

6. Полученные закономерности формирования поля напряжений могут послужить научной основой разработки комплекса профилактических мер для повышения безопасности горных работ на Николаевском месторождении в условиях влияния тектонически-активных разломов, на глубинах более 800 м.

4. ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ГОРНЫХ УДАРОВ И СНИЖЕНИЮ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РИСКА В УСЛОВИЯХ НИКОЛАЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

4.1. Параметры региональных мер безопасности при ведении горных работ в условиях влияния геодинамически активных разломов

Трассировка подготовительных выработок

В массиве Николаевского месторождения действует неравнокомпонентное поле напряжений, в котором горизонтальные составляющие превышают гравитационную составляющую в 1,5–2,5 раза, указывая на определяющее влияние тектонических сил в формировании НДС. В условиях неравно-компонентного поля напряжений стандартная рекомендация [39] состоит в проведении капитальных и подготовительных выработок преимущественно в направлении наибольшей компоненты тензора напряжений, тем самым значительно снижая уровень начальных концентраций напряжений, в частности, в кровле горных выработок.

В условиях Николаевского месторождения данная мера безопасности требует корректировки при расположении подготовительных выработок под отработку очистных блоков. Взаимно-перпендикулярное расположение штреков и ортов, пройденных под отработку очистного блока, обеспечивает невозможность ориентирования всех подготовительных выработок по направлению максимальных сжимающих напряжений. Например, в случае расположения штреков по направлению наибольшей компоненты тензора напряжений, расположение ортов будет перпендикулярно ему, что тем самым значительно увеличит уровень начальных концентраций напряжений в кровле ортов.

На рисунке 4.1.1 представлен полученный по результатам моделирования график распределения максимальных горизонтальных напряжений σ_y в кровле ортов и штреков, расположенных на глубине 800 м, в зависимости от их расположения относительно направления главных сжимающих напряжений.

Установлено, что наиболее интенсивное снижение максимального уровня напряжений в кровле выработок обеспечивается при расположении ортов и штреков под углом 45° к максимальным сжимающим напряжениям (рисунок 4.1.1).



Рисунок 4.1.1 – График распределения максимальных горизонтальных напряжений σ_y в кровле ортов и штреков, расположенных на глубине 800 м, в зависимости от их ориентировки к главным сжимающим напряжениям

Для проверки эффективности предложенного варианта расположения подготовительных выработок дополнительно промоделирован вариант расположения ортов и штреков под углом 45° к направлению наибольшей компоненты тензора напряжений на гор. –323м под отработку камер 3 и 4 блока 7 рудной залежи «Харьковская».

На рисунке 4.1.2 представлены результаты математического моделирования. Видно, что расположение ортов и штреков под углом 45° к направлению максимальных сжимающих напряжений обеспечивает эффективное снижение максимального уровня напряжений в кровле выработок по сравнению с фактическим вариантом отработки камер 3 и 4 блока 7 (рисунок 4.1.2).

Максимальный уровень горизонтальных напряжений σ_y снижается на 12% – со 115 до 101 МПа (рисунок 4.1.2). Максимальный уровень интенсивности касательных напряжений $\tau_{\text{инт}}$ снижается на 14% – с 79 до 68 МПа.

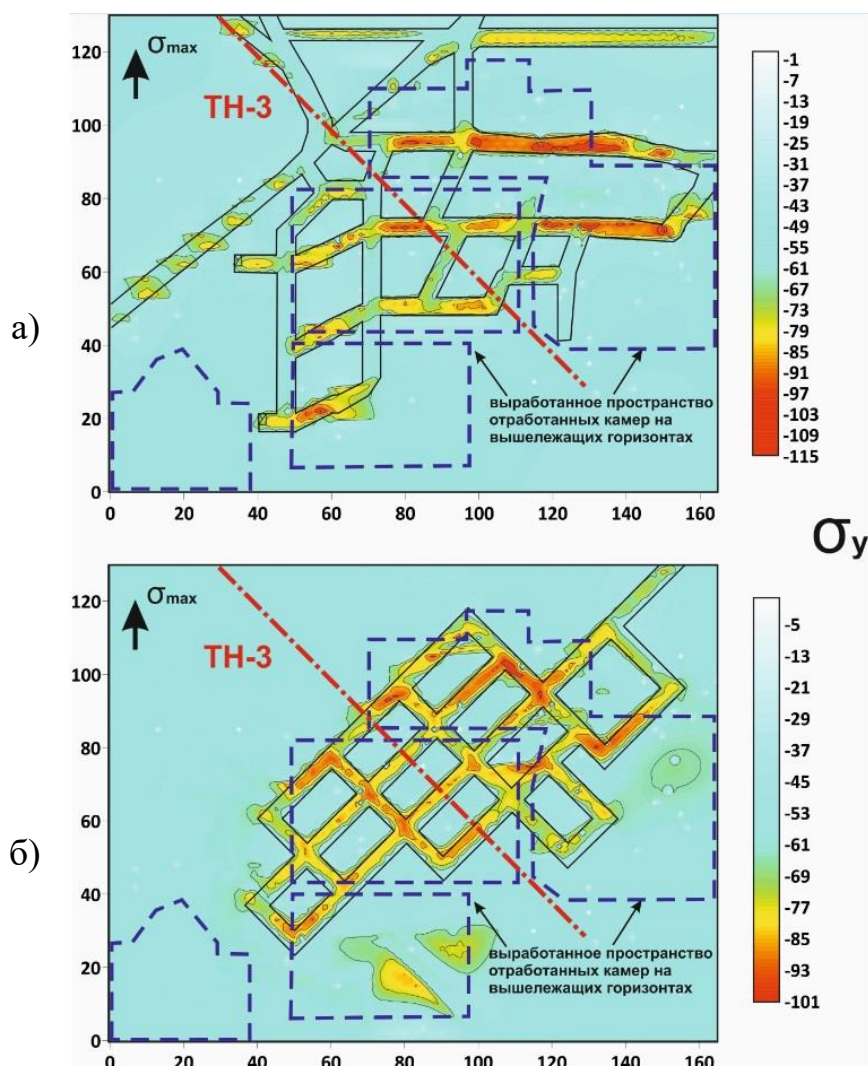


Рисунок 4.1.2 – Распределение горизонтальных напряжений σ_y в кровле горных выработок, расположенных на гор. –323м, при фактическом варианте расположения штреков и ортов (а) и предлагаемом варианте (б) под углом 45° к направлению максимальных сжимающих напряжений

Таким образом, использование предложенного варианта трассировки подготовительных выработок под отработку очистного блока под углом 45° к направлению максимальных сжимающих напряжений обеспечивает снижение максимального уровня концентраций напряжений в кровле выработок на 12–14%, тем самым снижая вероятность возникновения динамических проявлений горного давления.

Стоит также отметить, что такая ориентировка выработок также выгодна и с точки зрения расположения их по отношению к разлому ТН-3: перпендикулярное и параллельное к разлому расположение выработок обеспечивает исключение высоких концентраций сжимающих напряжений на их пересечении.

Конструктивные особенности системы разработки

Исходя из результатов известных и выполненных расчётно-теоретических и экспериментальных исследований (разделы 2 и 3), один из основополагающих принципов безопасной отработки удароопасных месторождений заключается в недопущении предельной концентрации напряжений в конструктивных элементах системы разработки вблизи мест ведения очистной выемки.

Результаты сейсмоакустического мониторинга (подразделы 2.2, 2.4) показали: значительное число зарегистрированных крупных динамических проявлений горного давления обусловлено отсутствием учёта влияния элементов тектонической структуры при планировании ведения очистных работ вдоль разломных структур. Необходимо установление правильной технологии при отработке выемочных блоков на пересечении с разломными структурами и, в частности, с разломом ТН-3.

Выше (подразделы 3.3 и 3.4) было установлено: концентрация максимальных сжимающих напряжений превышает предельно допустимые значения при расположении контуров очистных камер под углом менее $57-71^\circ$ к тектонически активному разлому ТН-3. В связи с этим при отработке глубоких горизонтов Николаевского месторождения может быть рекомендовано ориентирование контуров очистных блоков перпендикулярно разломным структурам. Причём, контуры полублоков, на которые разбивается очистная камера, также должны быть перпендикулярны им.

Для проверки эффективности предложенного варианта отработки очистных блоков дополнительно на примере блока 40 промоделирован вариант ориентации его контуров перпендикулярно разлому ТН-3.

На рисунке 4.1.3 представлена схема моделирования фактического (а) и предлагаемого (б) варианта отработки блока 40, контуры которого расположены на пересечении с разломом ТН-3.

Моделирование предлагаемой технологии отработки блока 40 и его сравнение с фактическим вариантом отработки осуществлялось в 5 этапов (рисунок 4.1.3б).

На рисунке 4.1.5 представлено распределение горизонтальных напряжений σ_x и σ_y в проекции на гор. –390 м при фактическом (а, в) и предлагаемом варианте ориентировки контуров камеры на конечной стадии отработки блока 40 (б, г).

На конечной стадии отработки блока 40 ситуации не меняется. При расположении контуров блока 40 под углом 45° к разлому ТН-3 максимальный уровень сжимающих напряжений σ_x составляет 224 МПа, растягивающих σ_y – 20 МПа, превышая предел прочности пород в несколько раз. При перпендикулярном расположении контуров блока 40 к разлому ТН-3 концентрации сжимающих напряжений отсутствуют (рисунок 4.1.5б, г).

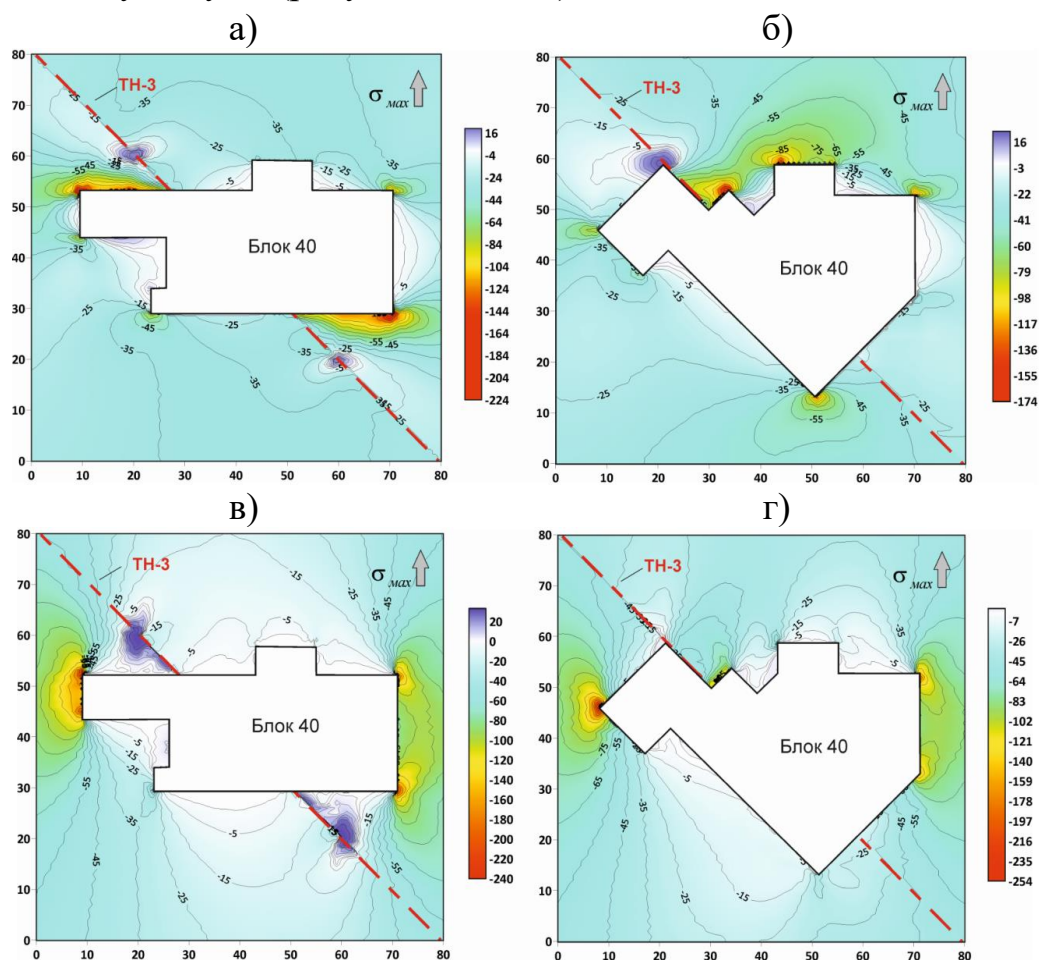


Рисунок 4.1.5 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x и σ_y в проекции на гор. –390 м при фактическом (а, в) и предлагаемом варианте 5-го этапа отработки блока 40 (б, г)

Таким образом, использование предложенного варианта отработки очистных блоков с расположением их контуров перпендикулярно разломным структурам, позволяет безопасно осуществлять горные работы, исключая концентрации

сжимающих напряжений, и тем самым снижая вероятность возникновения динамических проявлений горного давления.

При проектировании конечных контуров очистных блоков возможны ситуации, при которых невозможно ориентировать их перпендикулярно разломным структурам из-за высоких потерь или разубоживания. Например, – при наличии протяженных участков контуров рудного тела, пересекающих разломную структуру под углом равным или меньше 45° . Данный фактор также должен учитываться при разработке профилактических мероприятий (рисунок 4.1.6).

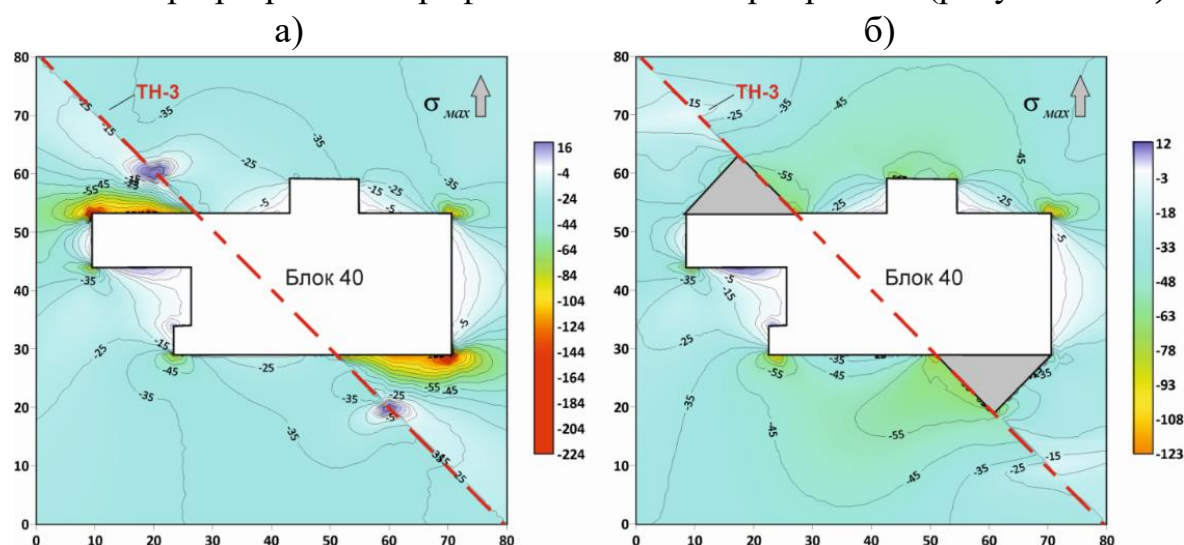


Рисунок 4.1.6 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x в проекции на гор. –390 м (а – без разгрузки остроугольных целиков; б – с учётом разгрузки остроугольных целиков, образованных на пересечении отработанного блока 40 и разлома ТН-3)

В таких случаях с целью снижения удароопасности очистных блоков, расположенных на пересечении с разломом ТН-3, до начала очистной выемки рекомендуется осуществлять разгрузку остроугольных породных участков с целью снижения высоких концентраций сжимающих напряжений за счет образования прямого угла между очистной камерой и разломом ТН-3 (рисунок 4.1.6б).

Использование данного технологического решения позволяет исключить высокие концентрации горизонтальных сжимающих напряжений при отработке выемочных блоков, расположенных на пересечении с разломом ТН-3.

Последовательность ведения очистных работ

При производстве очистных работ вдоль разломных структур необходима не

только рациональные технологии обработки, но также обоснование определённой очередности обработки выемочных участков.

Результаты моделирования участка рудной залежи «Восток-1» в районе отработанных камер 1-2 блока Южный-1, камер 1-3 блока Южный-2, а также блоков 40 и 45 (см. подраздел 3.3) показали, что наиболее высокие концентрации сжимающих напряжений наблюдаются в районе блока 40 и очистной камеры 2 блока «Южный -1». Данные блоки расположены на пересечении с разломом ТН-3 и в зоне опорного давления от окружающих их очистных камер.

В этой связи для повышения безопасности горных работ предлагается обработку очистных блоков, расположенных на пересечении с разломом ТН-3, осуществлять в первую очередь. Обработку камер, расположенных за пределами разлома ТН-3, рекомендуется вести после полной обработки ближайших к ним камер, расположенных на пересечении с разломом ТН-3.

Для проверки предлагаемого технологического решения выполнено моделирование двух вариантов обработки очистных блоков в районе рудной залежи «Восток-1» (гор. –420м: –375м). Результаты моделирования фактического и предлагаемого вариантов обработки сведены в таблице 4.1.1.

Таблица 4.1.1 – Максимальные горизонтальные сжимающие напряжения σ_x и σ_y в фактическом и предлагаемом вариантах последовательности обработки очистных блоков рудной залежи «Восток-1»

Камера	Фактический вариант последовательности обработки			Предлагаемый вариант последовательности обработки			Разница между предлагаемым и фактическим вариантом	
	Этап обработки	σ_x	σ_y	Этап обработки	σ_x	σ_y	$d\sigma_x$	$d\sigma_y$
Южный 2-1	1	38,49	78,03	4	42,96	71,83	4,47	-6,2
Южный 1-1	2	35,27	71,09	2	36,2	71,83	0,93	0,74
Южный 2-3	3	41,32	78,58	6	46,52	91,51	5,2	12,93
Южный 2-2	4	57,30	69,02	5	53,09	70,76	-4,21	1,74
Южный 1-2	5	43,95	93,93	1	35,71	59,66	-8,24	-34,27
Блок 40	6	45,85	67,85	3	41,34	68,64	-4,51	0,79
Блок 45	7	47,50	83,74	7	47,50	83,74	0	0

Расчётами выявлено существенное снижение концентраций сжимающих напряжений в районе отрабатываемых камер, расположенных вдоль разлома ТН-3 в предлагаемом варианте порядка отработки участка рудной залежи «Восток-1».

Наибольшее снижение их наблюдается при отработке камеры 2 блока «Южный-1» (рисунок 4.1.7). Оработка камеры 2 блока «Южный-1» приводит к снижению горизонтальных напряжений σ_x на 8 МПа, σ_y – на 34 МПа за счёт отсутствия близлежащих камер в зоне опорного давления, снижая вероятность возникновения горнодинамических явлений (таблица 4.1.1).

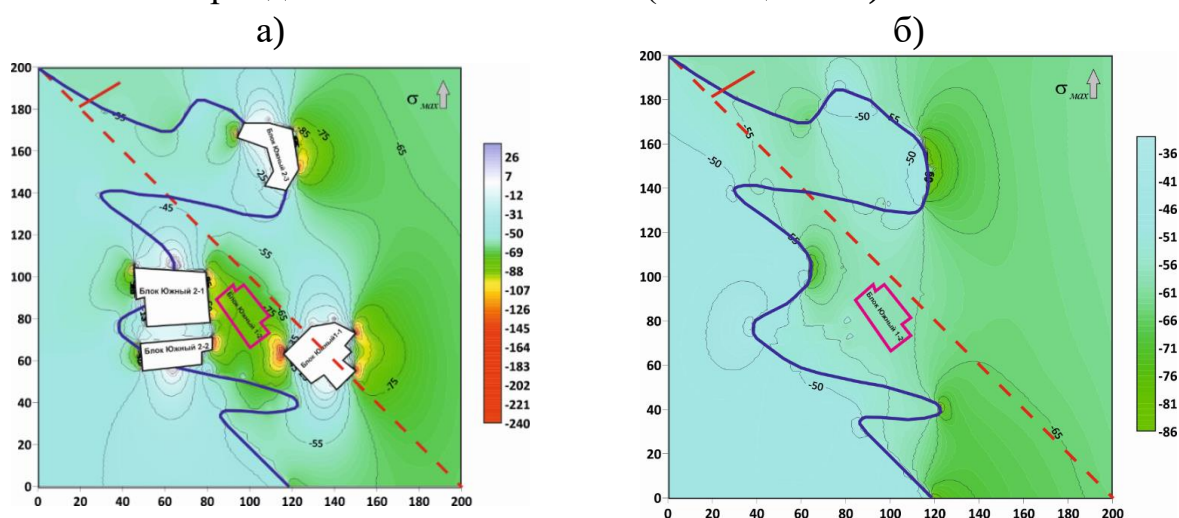


Рисунок 4.1.7 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x в районе рудной залежи «Восток» в проекции на горизонт–390 м при фактическом (а) и предлагаемом порядке отработки камеры 2 блока «Южный-1».

Небольшое снижение сжимающих напряжений (на 4 МПа) в предлагаемом варианте очередности отработки наблюдается в камерах 2 блока «Южный-2» и блока 40 (таблица 4.1.1). В то же время небольшое увеличение напряжений σ_x – на 5 МПа и σ_y – на 12 МПа в предлагаемом варианте отработки камеры 3 блока Южный-2 (таблица 4.1.1) не оказывает существенного влияния на НДС массива ввиду удалённости блока от разломных структур. За период с 2011 по 2020 г. в районе камеры 3 блока Южный-2 крупных динамических проявлений горного давления зарегистрировано не было, что подтверждает правомерность данной рекомендации.

Таким образом, в целях повышения безопасности очистных работ предложен новый порядок отработки камер, при котором в первую и вторую очередь рекомендуется осуществлять отработку удароопасных блоков, расположенных на

пересечении с разломом ТН-3 (в зависимости от их ориентирования по отношению к разлому ТН-3). Отработку камер, расположенных за пределами разлома ТН-3, рекомендуется осуществлять в третью очередь.

Закладка очистных камер твердеющими смесями

Известно, что одним из наиболее эффективных способов управления горным давлением является закладка выработанного пространства твердеющими смесями [47, 68]. Изначально для освоения рудных запасов Николаевского месторождения применялась камерно-целиковая система разработки с твердеющей закладкой, но затем для снижения затрат был осуществлен переход на камерную систему разработки с управляемым обрушением кровли.

С учётом выявленных в последние годы на Николаевском месторождении проявлений техногенной сейсмичности возникает необходимость использования дополнительных мер снижения удароопасности [21, 22]. Несмотря на значительное удорожание производства, в условиях Николаевского месторождения дополнительно может быть рекомендована выборочная закладка твердеющими смесями блоков, расположенных на пересечении с разломом ТН-3 (рисунок 4.1.8б, г), в районе которых регистрируется наибольшее число крупных динамических проявлений горного давления [149].

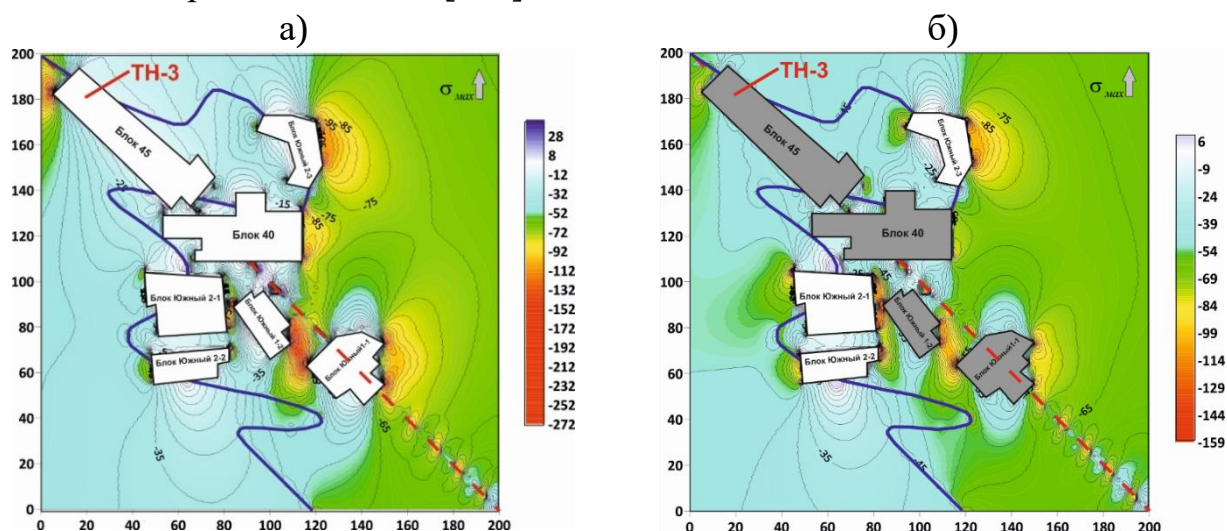


Рисунок 4.1.8 – Распределение горизонтальных напряжений σ_y после полной отработки выработанного пространства в районе рудной залежи «Восток-1» в проекции на гор. –390 м (а – без учета закладки выработанного пространства; б – с учетом закладки всех отработанных камер на пересечении с разломом ТН-3)

С целью оценки влияния твердеющей закладки на напряженно-

деформированное состояние района отработки южной части рудной залежи «Восток-1» промоделированы 2 расчетные схемы:

1. Без учета закладки выработанного пространства твердеющими смесями (рисунок 4.1.8а, в).

2. С закладкой твердеющими смесями всех отработанных камер, расположенных на пересечении с разломом ТН-3 (рисунок 4.1.8б, г).

Предложенный вариант выборочной закладки камер, расположенных на пересечении с разломными структурами, позволяет снизить концентрацию максимальных сжимающих напряжений σ_x – со 141 до 105 МПа (на 25% – рисунок 4.1.8а, б); σ_y – с 272 до 159 МПа (на 42% – рисунок 4.1.8в, г).

Таким образом, предложенный комплекс мер безопасности позволит максимально исключить чрезмерные концентрации напряжений до начала, в процессе и после отработки очистных блоков, тем самым снижая до минимума вероятность возникновения удароопасных ситуаций.

4.2. Обоснование эффективных профилактических мероприятий локального характера для отработки глубоких горизонтов Николаевского месторождения

Ориентирование подготовительных выработок

Результаты моделирования напряжений в подготовительных выработках (см. подраздел 3.4), представлены на рисунке 4.2.1 в виде графика рекомендуемой ориентировки блоковых ортов и штреков по отношению к направлению главных сжимающих напряжений в зависимости от глубины расположения выработок.

Анализ результатов показывает следующее:

– до отметки гор. –220 м максимальные напряжения в конструктивных элементах системы разработки не превышают предельно допустимых значений при любой ориентировке выработок относительно направления главных сжимающих напряжений (рисунок 4.2.1 – 1);

– предложенный вариант трассировки выработок под отработку очистного блока под углом 45° к направлению максимальных сжимающих напряжений

обеспечивает безопасный уровень напряжений в кровле выработок при ведении горных работ в отметках –220м ...–370м (рисунок 4.2.1 – 2);

– безопасное ведение горных работ на глубине более 750м (ниже гор. –370м) возможно только с применением дополнительных специальных профилактических мероприятий локального характера (рисунок 4.2.1 – 3).

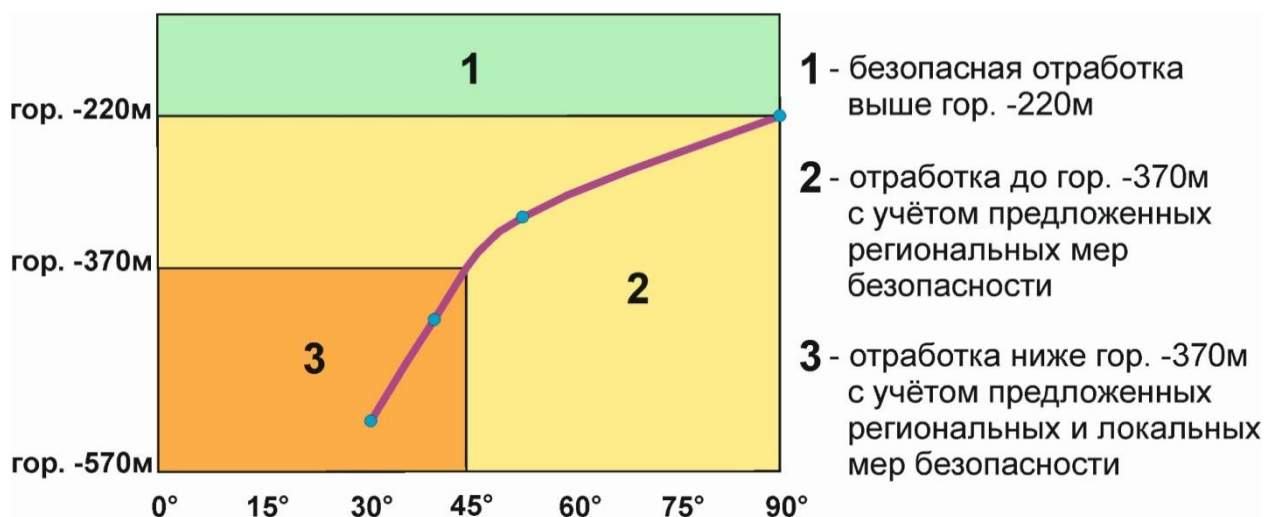


Рисунок 4.2.1 – График рекомендуемой ориентировки ортов и штреков по отношению к направлению главных сжимающих напряжений и другие меры безопасности в зависимости от глубины отработки

Бурение разгрузочных скважин

Одним из проверенных и надежных локальных способов снижения удароопасности горных конструкций и краевых частей массива горных пород является метод бурения разгрузочных скважин. Эффективность его основана на использовании энергии горного давления и зависит от правильного выбора параметров: в первую очередь, расстояния между скважинами [61, 80, 155].

В качестве основы для определения необходимости разгрузки кровли выработки предлагается использовать выражение 4.1 (полученную закономерность 3.4 из подраздела 3.4):

$$\sigma_{\max_ск} = 39,30872 - 0,103444 * z - (10,864202 + 0,02859 * z) * \cos\left(\frac{\alpha * \pi}{90}\right), \quad (4.1)$$

где $\sigma_{\max}$ – максимальные сжимающие напряжения в кровле выработки, МПа;

z – горизонт расположения выработки, м;

α – угол между выработкой и направлением максимальных сжимающих напряжений, град.

Воспользуемся критерием хрупкого разрушения (выражение 3.1 из

подраздела 3.1):

$$\sigma_{\max_сж} \leq K_s \cdot \sigma_{сж} \quad (4.2)$$

где $\sigma_{\max_сж}$ – максимальные сжимающие напряжения, действующие в массиве (кровле выработки), МПа; K_s – коэффициент структурного ослабления; $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие, МПа.

Поменяв знак неравенства, и объединив формулы 4.1 и 4.2, получим:

$$39,30872 - 0,103444 \cdot z - (10,864202 + 0,02859 \cdot z) \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{90}\right) > K_s \cdot \sigma_{сж} \quad (4.3)$$

Таким образом, необходимость проведения разгрузочных мероприятий зависит от глубины, на которой пройдена выработка, величины угла между выработкой и направлением главных напряжений и типа пород.

Для различных типов пород критерий необходимости проведения разгрузочных мероприятий в кровле выработки будет иметь вид:

известняк:

$$39,30872 - 0,103444 \cdot z - (10,864202 + 0,02859 \cdot z) \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{90}\right) > 79,2 \quad (4.4)$$

туфы:

$$39,30872 - 0,103444 \cdot z - (10,864202 + 0,02859 \cdot z) \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{90}\right) > 79,7 \quad (4.5)$$

скарны

$$39,30872 - 0,103444 \cdot z - (10,864202 + 0,02859 \cdot z) \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{90}\right) > 108,1 \quad (4.6)$$

Определение оптимального расположения и параметров разгрузочных скважин, обеспечивающих максимальное снижение напряженного состояния междуэтажных целиков на Николаевском месторождении, проводилось на основании результатов моделирования, представленных на рисунке 4.2.2.

Рассмотрено 4 варианта моделей:

1. Без разгрузочных скважин (рисунок 4.2.2а).
2. Вертикальные скважины в кровле штрека длиной 5 м (рисунок 4.2.2б).
3. Создание двух горизонтальных скважин, в бортах штрека (рисунок 4.2.2в).
4. Создание двух наклонных скважин под углом 45 град (рисунок 4.2.2г).

Результаты моделирования показали: максимальная концентрация напряжений наблюдается в кровле выработки и в краевых частях очистной камеры. При этом горизонтальные и наклонные разгрузочные скважины в бортах штрека

разгружают лишь борта выработки, а напряжения в кровле и целике остаются практически без изменения (рисунок 4.2.2в, г). При создании ряда вертикальных скважин в кровле штрека происходит перераспределение напряжений, приводящее к разгрузке кровли штрека (рисунок 4.2.2б).

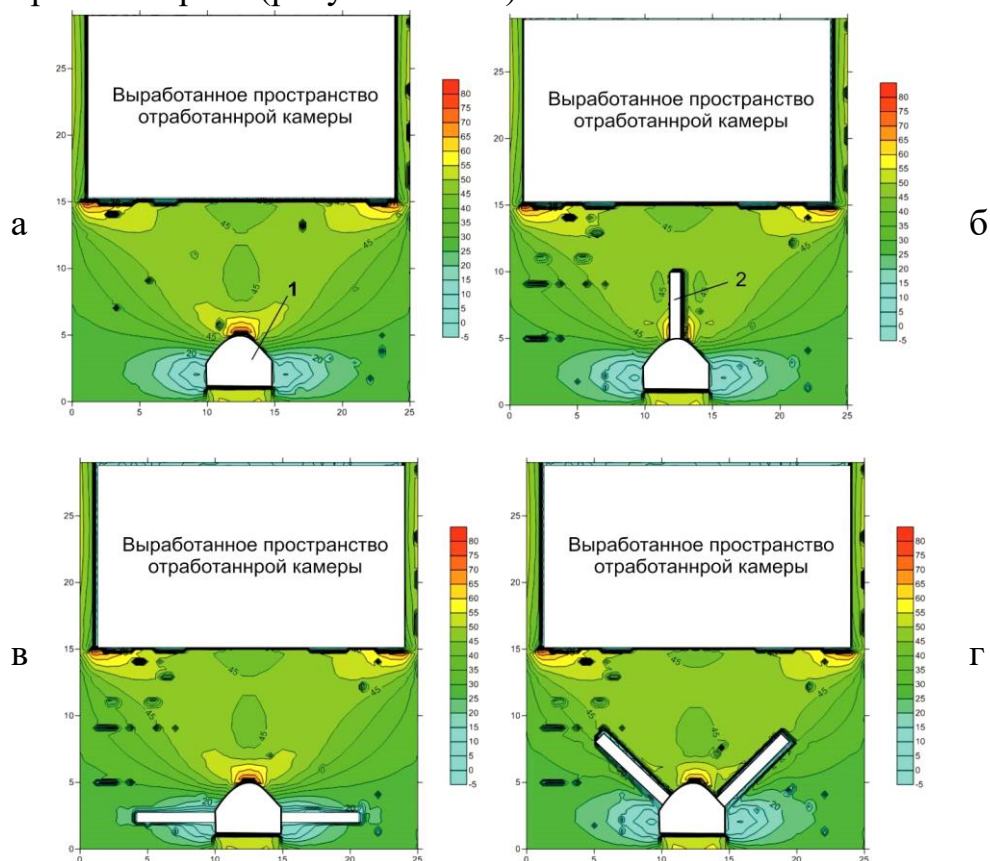


Рисунок 4.2.2 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x в различных вариантах направления разгрузочных скважин (а – без разгрузочных скважин; б – вертикальная скважина в кровле штрека длиной 5м; в – горизонтальные скважины длиной 5м; г – наклонные скважины в кровле штрека длиной 5м)

Следует также отметить, что само по себе бурение разгрузочных скважин не приводит к разгрузке напряжений в кровле штрека (рисунок 4.2.3а, б). Образование саморазвивающейся защитной локальной зоны с высокой податливостью будет осуществляться только в случае, если массив будет работать не на разрушение кровли штрека, а на разрушение межскважинных целиков. Саморазрушение межскважинных перемычек за счет возникновения предельного напряженного состояния приводит к образованию разгрузочной щели и последующей релаксации (разгрузке) массива (рисунок 4.2.3в, г).

Для определения оптимальных параметров бурения разгрузочных скважин, обеспечивающих максимально эффективное разрушение перемычек и снижение напряженного состояния кровли штреков, было проведено моделирование в зависимости от ширины межскважинного целика при различном диаметре разгрузочных скважин.

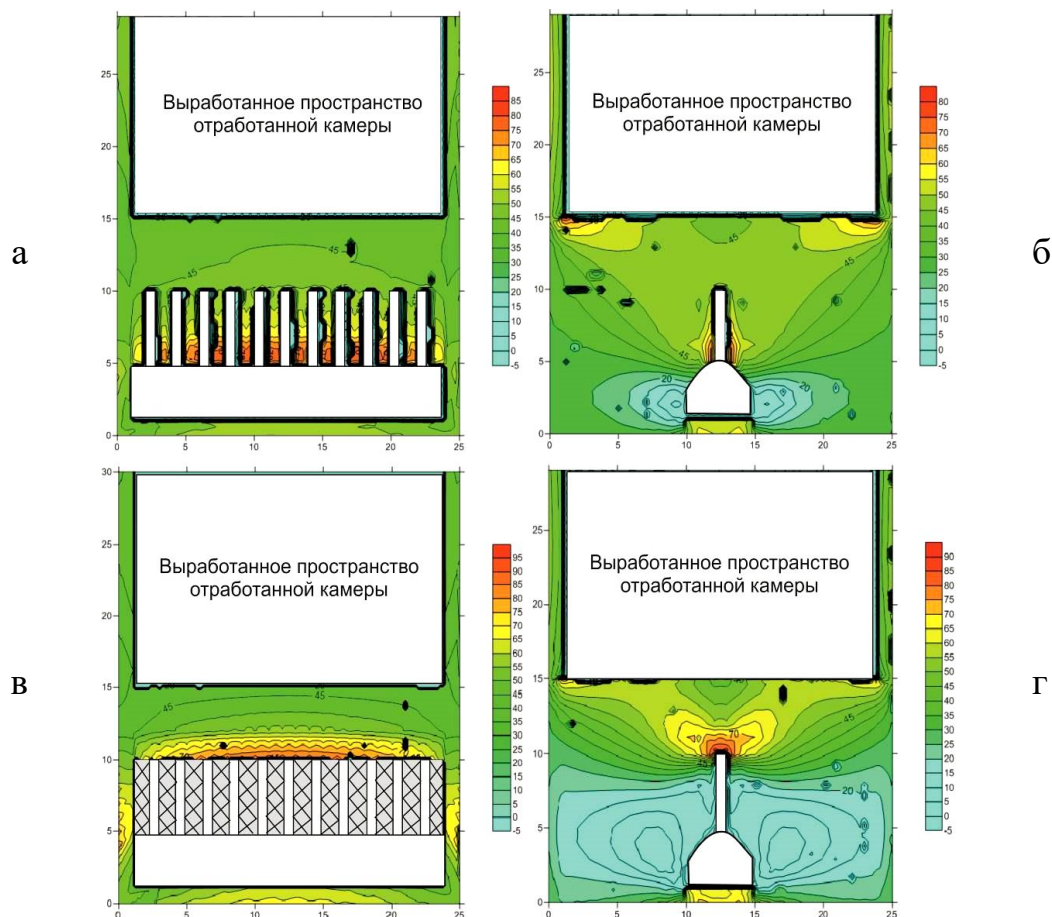


Рисунок 4.2.3 – Распределение максимальных горизонтальных напряжений σ_x в процессе бурения разгрузочных скважин (а) и после их разрушения и образования разгрузочной щели (б)

Рассмотрено 3 варианта диаметра разгрузочных скважин (0.1м, 0.3м и 0.5м) и 5 вариантов ширины межскважинного целика (0.1м, 0.2м, 0.3м, 0.4м и 0.5м). При этом моделировалось и рассчитывалось 2 варианта выработки, расположенной в зоне опорного давления отработанного на вышележащем горизонте очистного блока, при перпендикулярном и параллельном направлении по отношению к максимальным сжимающим напряжениям. Расчеты проводились при условии проходки выработки на гор. -420м (глубина 800м) в массиве, сложенном из известняка.

Таким образом, всего было рассчитано 30 вариантов моделей.

Анализ результатов моделирования оценивался по максимальным значениям горизонтальных сжимающих напряжений в точке между центром межскважинного целика и контуром скважины (рисунок 4.2.4).

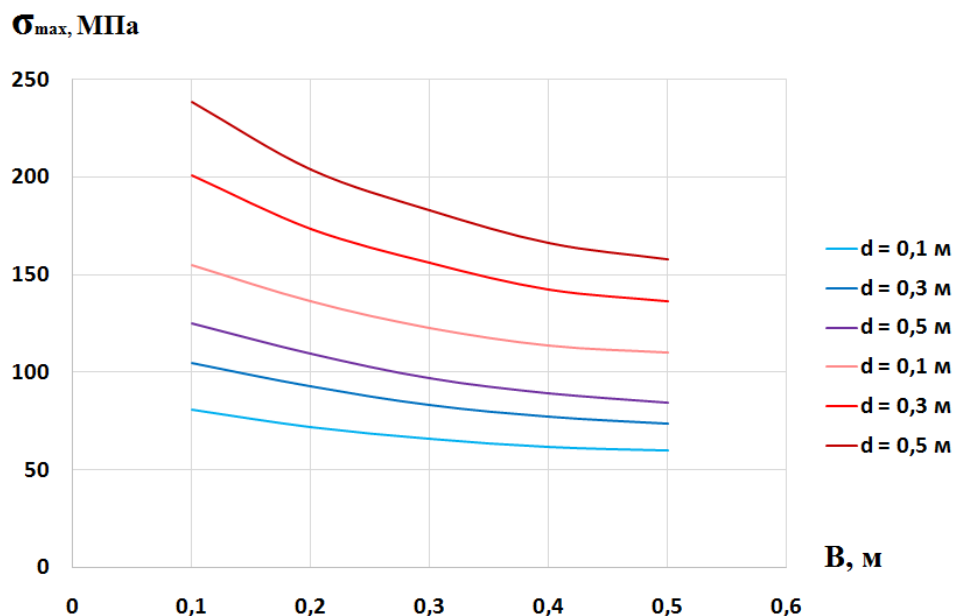


Рисунок 4.2.4 – График распределения максимальных горизонтальных сжимающих напряжений в зависимости от ширины межскважинного целика и диаметра разгрузочных скважин

На рисунке 4.2.4 и 4.2.5 оттенками красного и синего цвета показаны соответственно результаты расчетов при перпендикулярном и параллельном расположении моделируемой выработки по отношению к максимальным сжимающим напряжениям.

Полученные по результатам моделирования значения напряжений соответствуют значениям напряжений в кровле до начала бурения скважин - 60,28 МПа при параллельном и 105,25 МПа при перпендикулярном расположении выработки относительно направления максимальных сжимающих напряжений.

Приведём полученные результаты расчётов к моделированию, при котором напряжения в кровле выработки будут соответствовать предельному сжимающему значению, представленному в таблице 3.1.2 (для массива известняков – 79,2 МПа).

Для этого помножим полученные значения напряжений на 1,3026 ($79,2 / 60,28$) при результатах моделирования параллельного расположения и на 0,7525 ($79,2 / 105,25$) при перпендикулярном расположении выработки по отношению к

направлению максимальных сжимающих напряжений. Результаты представлены на рисунке 4.2.5.

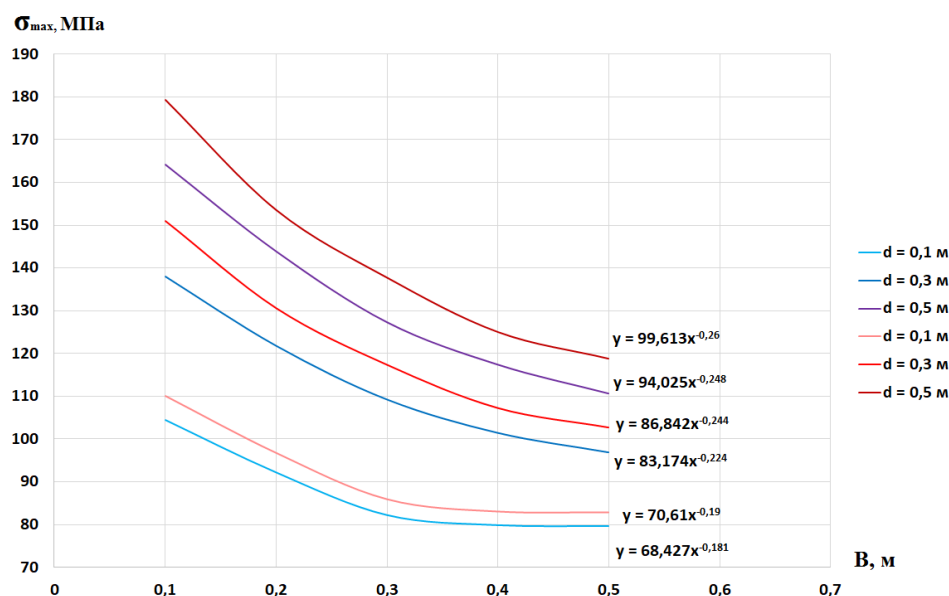


Рисунок 4.2.5 – График распределения максимальных горизонтальных сжимающих напряжений σ_{max} в зависимости от ширины межскважинного целика и диаметра разгрузочных скважин при максимальных исходных сжимающих напряжениях в кровле выработки - 79,2 МПа

Полученные на рисунке 4.2.5 зависимости максимальных напряжений σ_{max} были аппроксимированы с помощью встроенных в Microsoft Excel степенной функции (рисунок 4.2.5).

При перпендикулярном расположении выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений аппроксимированные функции будут иметь вид:

Для диаметра $d = 0,1 м$

$$\sigma_{max} = 70,64 * b^{-0,19} \quad (4.7)$$

Для диаметра $d = 0,3 м$

$$\sigma_{max} = 86,842 * b^{-0,244} \quad (4.8)$$

Для диаметра $d = 0,5 м$

$$\sigma_{max} = 99,613 * b^{-0,26} \quad (4.9)$$

При параллельном расположении выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений:

Для диаметра $d = 0,1 м$

$$\sigma_{max} = 68,427 * b^{-0,181} \quad (4.10)$$

Для диаметра $d = 0.3$ м

$$\sigma_{\max} = 83,174 * b^{-0,224} \quad (4.11)$$

Для диаметра $d = 0.5$ м

$$\sigma_{\max} = 94,025 * b^{-0,248} \quad (4.12)$$

Подставив в выражения 4.7 – 4.12 предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ (для известняка 99 МПа), получим рекомендуемые значения ширины междускважинного целика b для образования защитной зоны при бурении разгрузочных скважин в кровле выработок. Полученные значения сведены в таблицу 4.2.1.

Таблица 4.2.1 – Рекомендуемые значения ширины междускважинного целика b для образования защитной зоны при бурении разгрузочных скважин в кровле выработок, расположенных в массиве известняка

	Расположение выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений					
	Перпендикулярное			Параллельное		
Диаметр d , м	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5
Расстояние между скважинами b , м	0,169	0,585	1,024	0,129	0,459	0,812
Отношение диаметра к расстоянию между скважинами (b/d)	1,69	1,95	2,048	1,29	1,53	1,624

Минимальные рекомендуемые значения расстояний между скважинами (b , м) при бурении разгрузочных скважин различного диаметра (d , м) в зависимости от расположения выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений представлены на рисунок 4.2.6.

Полученные на рисунке 4.2.6 зависимости расстояния b (м) между разгрузочными скважинами от их диаметра d (м) также были аппроксимированы с помощью встроенных в Microsoft Excel полиномиальной функцией 2-й степени (рисунок 4.2.5).

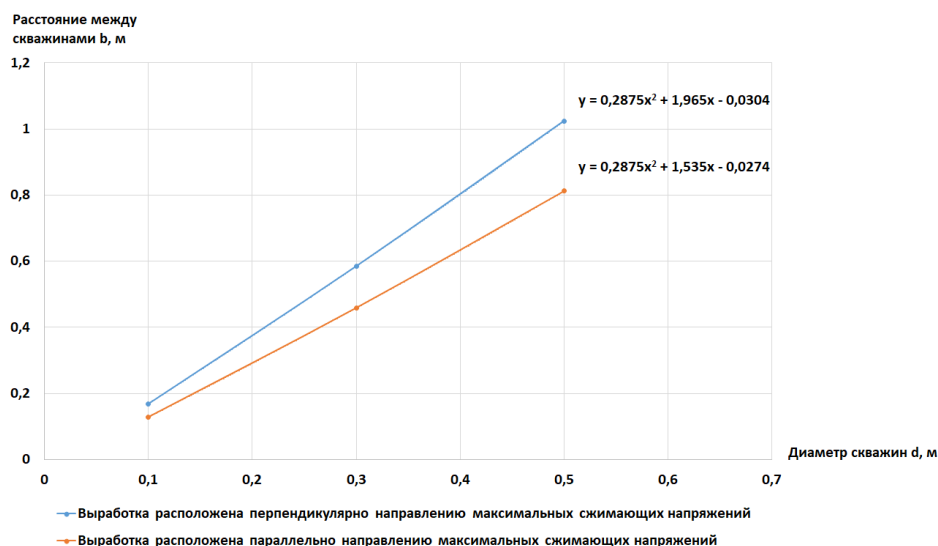


Рисунок 4.2.6 – Минимальные рекомендуемые значения расстояний между скважинами (b , м) при бурении разгрузочных скважин различного диаметра (d , м) при перпендикулярном и параллельном расположении выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений

При перпендикулярном расположении выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений аппроксимированная функция будет иметь вид:

$$b = 0,2875 * d^2 + 1,965 * d - 0,0304 \quad (4.13)$$

Для параллельного расположении выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений:

$$b = 0,2875 * d^2 + 1,535 * d - 0,0274 \quad (4.14)$$

Рассчитаем рекомендуемое значение ширины межскважинного целика b для широко используемого на Николаевском месторождении диаметра бурения разгрузочных скважин $d = 0,105$ м.

Таким образом, было установлено, что оптимальное расстояние между скважинами для образования разгрузочной щели существенно зависит от угла между выработкой и направлением главных напряжений, действующих в массиве горных пород.

При диаметре бурения разгрузочных скважин $d = 0,105$ м рекомендуемое значение ширины межскважинного целика при перпендикулярном расположении выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений

составит $b = 0,179\text{м}$ (отношение $b / d = 1,704$), при параллельном расположении выработки - $b = 0,137\text{м}$ (отношение $b / d = 1,305$).

Полученные выше рекомендуемые минимальные значения ширины межскважинного целика рассчитаны для выработок, в которых сжимающие напряжения в кровле составляют предельно допустимые значения в 79,2 МПа для массива известняков, представленному в таблице 3.1.2 (см. подраздел 3.1). При более высоких значениях напряжений в кровле выработки расстояние между скважинами необходимо увеличивать. Для того, что чтобы определить, насколько необходимо увеличивать расстояние между разгрузочными скважинами повторим выполненные выше расчеты (рисунок 4.25, 4.26) для значений максимальных сжимающих напряжений в кровле выработки, составляющих $0,85 \cdot \sigma_{сж}$ (84,15 Дж) и $0,9 \cdot \sigma_{сж}$ (89,1 Дж).

Рекомендуемые значения ширины межскважинного целика b для значений максимальных сжимающих напряжений в кровле выработки, составляющих $0,85 \cdot \sigma_{сж}$ (84,15 Дж), представлены в таблице 4.2.2.

Таблица 4.2.2 – Рекомендуемые значения ширины межскважинного целика b для значений максимальных сжимающих напряжений в кровле выработки, составляющих $0,85 \cdot \sigma_{сж}$ (84,15 Дж)

	Расположение выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений					
	Перпендикулярное			Параллельное		
Диаметр d , м	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5
Расстояние между скважинами b , м	0,232	0,749	1,293	0,182	0,602	1,037
Отношение диаметра к расстоянию между скважинами (b/d)	2,32	2,497	2,586	1,82	2,007	2,074

При перпендикулярном расположении выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений аппроксимированная функция будет иметь вид:

$$b = 0,3375 \cdot d^2 + 2,45 \cdot d - 0,0164 \quad (4.15)$$

Для параллельного расположении выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений:

$$b = 0,1875 \cdot d^2 + 2,025 \cdot d - 0,0244 \quad (4.16)$$

Рекомендуемые значения ширины межскважинного целика b для значений максимальных сжимающих напряжений в кровле выработки, составляющих $0,9 \cdot \sigma_{сж}$ (89,1 Дж), представлены в таблице 4.2.3.

Таблица 4.2.3 – Рекомендуемые значения ширины межскважинного целика b для значений максимальных сжимающих напряжений в кровле выработки, составляющих $0,9 \cdot \sigma_{сж}$ (89,1 Дж)

	Расположение выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений					
	Перпендикулярное			Параллельное		
Диаметр d , м	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5
Расстояние между скважинами b , м	0,314	0,947	1,611	0,249	0,777	1,307
Отношение диаметра к расстоянию между скважинами (b/d)	3,14	3,157	3,222	2,49	2,59	2,614

При перпендикулярном расположении выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений аппроксимированная функция будет иметь вид:

$$b = 0,3875 \cdot d^2 + 3,01 \cdot d + 0,0091 \quad (4.17)$$

Для параллельного расположении выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений:

$$b = 0,025 \cdot d^2 + 2,63 \cdot d - 0,0142 \quad (4.18)$$

Итоговые рассчитанные рекомендуемые значения ширины межскважинного целика b и отношения b/d для используемого на Николаевском месторождении диаметра бурения разгрузочных скважин 0,105 м сведены в таблице 4.2.4.

Таблица 4.2.4 – Рекомендуемые значения ширины межскважинного целика b и отношения b/d для используемого на Николаевском месторождении диаметра бурения разгрузочных скважин 0,105 м

Максимальные сжимающие напряжения в кровле выработки σ_{max} , МПа	Расположение выработки от направления максимальных сжимающих напряжений			
	Перпендикулярное (90°)		Параллельное (0°)	
	Расстояние между скважинами b , м	Отношение b/d	Расстояние между скважинами b , м	Отношение b/d
$0,8 \cdot \sigma_{сж} = 79,2$	0,179	1,705	0,137	1,305
$0,85 \cdot \sigma_{сж} = 84,15$	0,244	2,324	0,192	1,829
$0,9 \cdot \sigma_{сж} = 89,1$	0,329	3,133	0,262	2,495

Рекомендуемые значения расстояний между скважинами (b , м) и отношения b/d при бурении разгрузочных скважин диаметром $d = 0,105$ м для различных вариантов расположения выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений (под углом 0, 45 и 90 градусов) представлены на рисунках 4.2.7 и 4.2.8 соответственно.

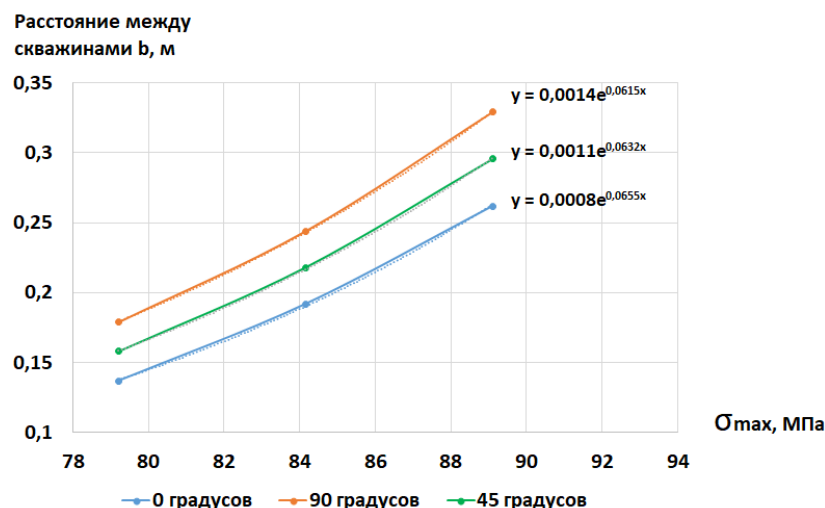


Рисунок 4.2.7 – Рекомендуемые значения расстояний между скважинами (b , м) при их бурении диаметром $d = 0,105$ м с расположением выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений под углом 0, 45 и 90 градусов.

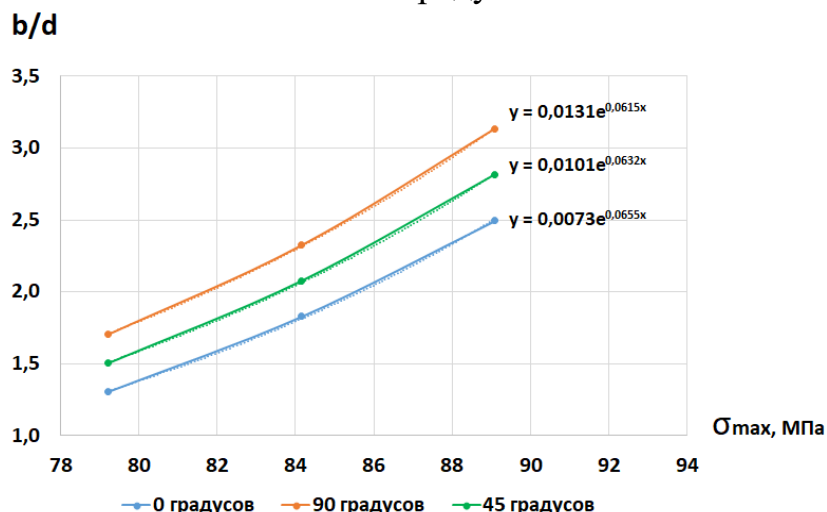


Рисунок 4.2.8 – Рекомендуемые значения отношения b/d при бурении разгрузочных скважин диаметром $d = 0,105$ м с расположением выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений под углом 0, 45 и 90 градусов.

При перпендикулярном расположении выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений аппроксимированные функции будут иметь вид:

$$b = 0,0014 * e^{(0,0615 * \sigma_{max})} \quad (4.19)$$

$$b/d = 0,0131 * e^{(0,0615 * \sigma_{max})} \quad (4.20)$$

При параллельном расположении выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений:

$$b = 0,0008 * e^{(0,0655 * \sigma_{max})} \quad (4.21)$$

$$b/d = 0,0073 * e^{(0,0655 * \sigma_{max})} \quad (4.22)$$

Рассчитав средние значения, получим значения ширины межскважинного целика (b, м) и отношения b/d при бурении разгрузочных скважин диаметром d = 0,105 м для предложенного в подразделе 4.1 варианта трассировки подготовительных выработок под отработку очистного блока под углом 45° к направлению максимальных сжимающих напряжений:

$$b = 0,0011 * e^{(0,0632 * \sigma_{max})} \quad (4.23)$$

$$b/d = 0,0101 * e^{(0,0632 * \sigma_{max})} \quad (4.24)$$

Для максимальных сжимающих напряжений в кровле подготовительных под отработку очистного блока выработок воспользуемся формулой 3.4 (подраздел 3.4):

$$\sigma_{max} = 39,30872 - 0,103444 * Z - (10,864202 + 0,02859 * Z) * \cos\left(\frac{\alpha * \pi}{90}\right), \quad (4.25)$$

где σ_{max} – максимальные сжимающие напряжения в кровле выработки, МПа;

Z – горизонт расположения выработки, м;

α – угол между выработкой и направлением максимальных сжимающих напряжений, град.

Подставив в формулу 4.31 значение $\alpha = 45^\circ$, получим:

$$\sigma_{max} = 39,30872 - 0,103444 * Z \quad (4.26)$$

Объединим выражение 4.32 с формулами 4.29 и 4.30:

$$b = 0,0011 * e^{(2,484311104 - 0,006537661 * Z)} \quad (4.27)$$

$$b/d = 0,0101 * e^{(2,484311104 - 0,006537661 * Z)} \quad (4.28)$$

Полученные выражения 4.27 и 4.28 рекомендуются к использованию на Николаевском месторождении для определения ширины межскважинного целика (b, м) и отношения b/d при бурении разгрузочных скважин диаметром d = 0,105 м для предложенного варианта трассировки подготовительных выработок под

отработку очистного блока, расположенных под углом 45° к направлению максимальных сжимающих напряжений.

Разгрузка камуфлетным или сотрясательным взрыванием

В качестве дополнительного локального метода разгрузки массива и приведения его в неудароопасное состояние рекомендуется производить камуфлетное или сотрясательное взрывание в пределах выявленного формирующегося очага горного удара [25, 55, 121, 130]. Выявление и геометризация потенциально удароопасной зоны и оценка эффективности выполненных мероприятий осуществляются с применением измерительных комплексов: сейсмоакустической системы контроля горного давления «Prognoz-ADS» или прибора локального контроля «Prognoz-L» [51, 101].

Региональный метод разгрузки экспериментально апробирован в условиях глубоких горизонтов Николаевского месторождения (при проходке уклона Северный-4 в этаже $-420 \dots -406$ м). На рисунке 4.2.5 показана схема участка рудничного поля, в пределах которого проводились разгрузочные мероприятия.

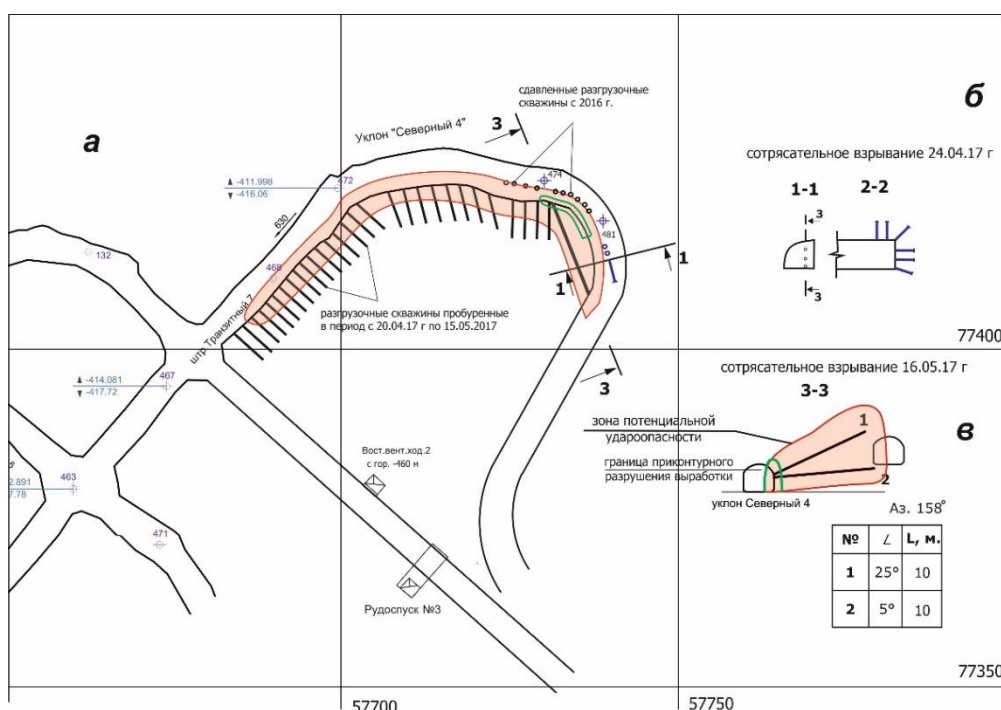


Рисунок 4.2.5 – Схема участка рудничного поля Николаевского месторождения и параметры разгрузочных мероприятий, выполненных в период с апреля по май 2017 г. в районе уклона Северный-4 на гор. -420 м

а – район уклона Северный-4 на гор. -420 м Николаевского месторождения; б – расположение скважин, пробуренных для сотрясательного взрывания 24.04.2017 г.; в – расположение скважин, пробуренных для сотрясательного взрывания 16.05.2017 г.

Выявленная акустически активная зона в районе проходки уклона Северный-4 расположена в месте пересечения участка ослабленных горных пород, сложенных туфобрекчиями (рисунок 4.2.6). При вскрытии этой зоны в забое уклона наблюдалось повышенное заколообразование, и по результатам замеров прибором «Prognoz-L» этот участок массива был отнесен к категории «Опасно» [51, 101]. В результате горные работы по уклону были приостановлены, и с целью разгрузки массива было принято решение провести сотрясательное взрывание забоя.

По результатам выполненной 24.04.2017 г. и 16.05.2017 г. разгрузки массива путем сотрясательного взрыва нескольких зарядов ВВ общей массой 3,5 кг акустическая активность массива снизилась в 2,5–3 раза, а потенциально опасная зона, по данным геоакустического контроля, переместилась в глубь массива.

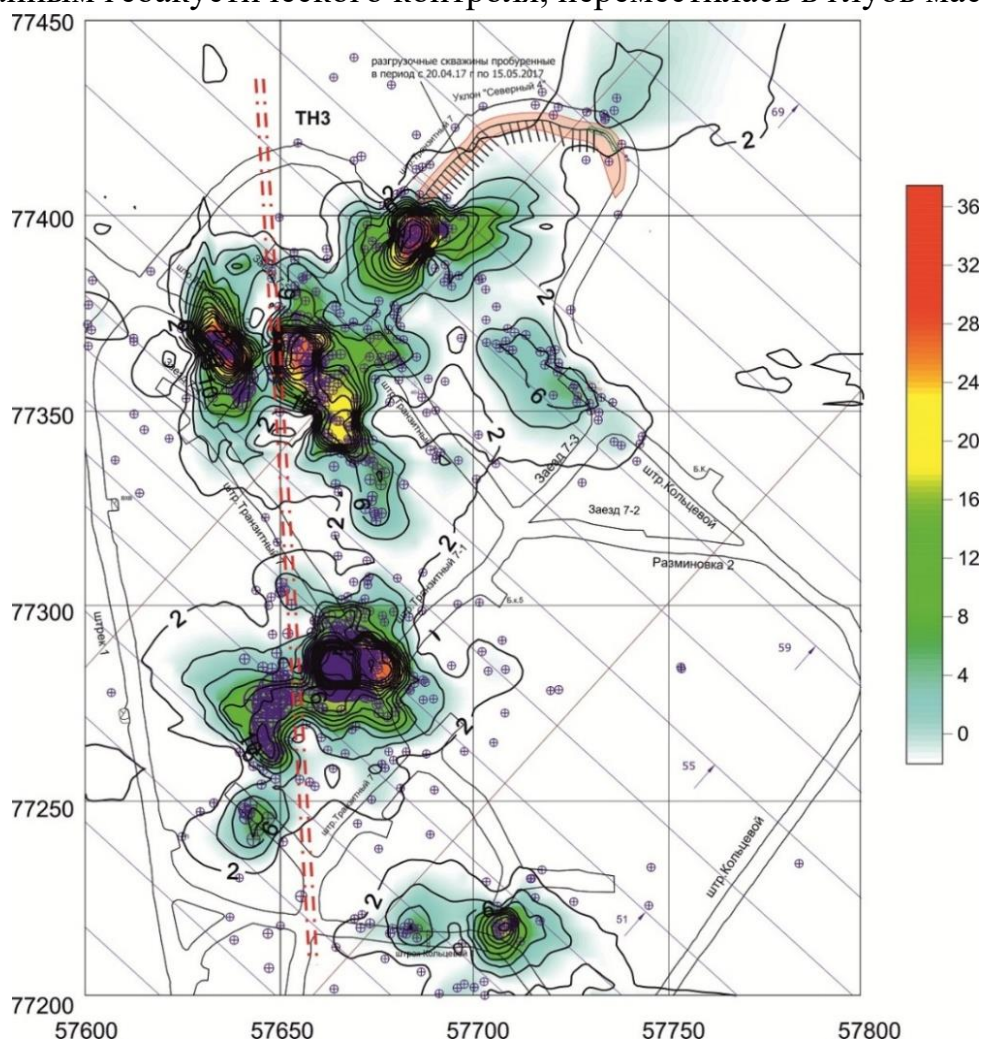


Рисунок 4.2.6 – Карта акустической активности на гор. –420 р.з. Восток-1 на Николаевском месторождении по данным сейсмоакустического контроля в апреле–мае 2017 г.

В 2019 году с целью снижения удароопасности массива и предотвращения

проявлений горного давления в динамической форме в районе блока 45 камер 1, 2 был составлен ещё один проект для проведения сотрясательного взрывания с целью разгрузки формирующегося очага геодинамического явления.

В период с 15 по 26 июня системой геомеханического мониторинга «Prognosz-ADS» в районе отработки блока 45 выявлена крупнейшая за весь период наблюдений акустически активная зона, в пределах которой зарегистрировано 850 АЭ-событий с суммарной энергией 19 тыс. Дж (рисунок 4.2.7а).

Резкий рост акустической активности на гор. –406 м в районе штрека Транспортный 45-2 в непосредственной близости от тектонически активного разлома ТН-3 совпал с переходом отработки камеры 2 блока 45 на горизонт –406 м.

Выявленная в процессе мониторинга крупная акустически активная зона свидетельствовала о высокой вероятности сильного геодинамического события, тем более что ранее 28 марта здесь уже имело место подобное событие.

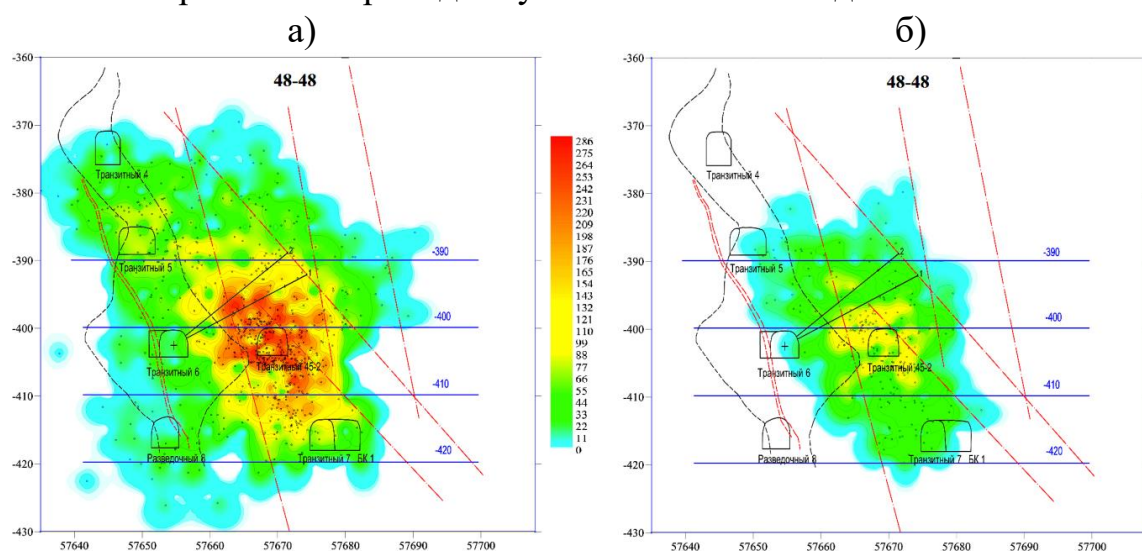


Рисунок 4.2.7 – Карта акустической активности до (а) и после проведения сотрясательного взрывания (б) на Николаевском руднике в проекции на разрез 48

С целью отработки эффективных способов снижения геодинамического риска был проведен опытно-промышленный эксперимент по разгрузке массива в районе блока 45 камер 1 и 2, где по данным мониторинга наблюдался процесс формирования очага горного удара. Для проведения разгрузки массива методом сотрясательного взрывания, согласно составленному проекту выполнено бурение двух веерообразных скважин диаметром 105 мм с расстоянием между веерами 5 м (рисунок

4.2.7).

Сотрясательный взрыв с целью разгрузки массива произведен 25.06.2019 в 07:11. После проведения взрывных работ наблюдался кратковременный рост акустической активности, а затем с 26.06.2019 г. в течение 10 дней наблюдался спад акустической активности до минимума (рисунок 4.2.7б и 4.2.8). Замеры прибором «Prognoz-L» после проведения эксперимента также показали категорию «Неопасно».

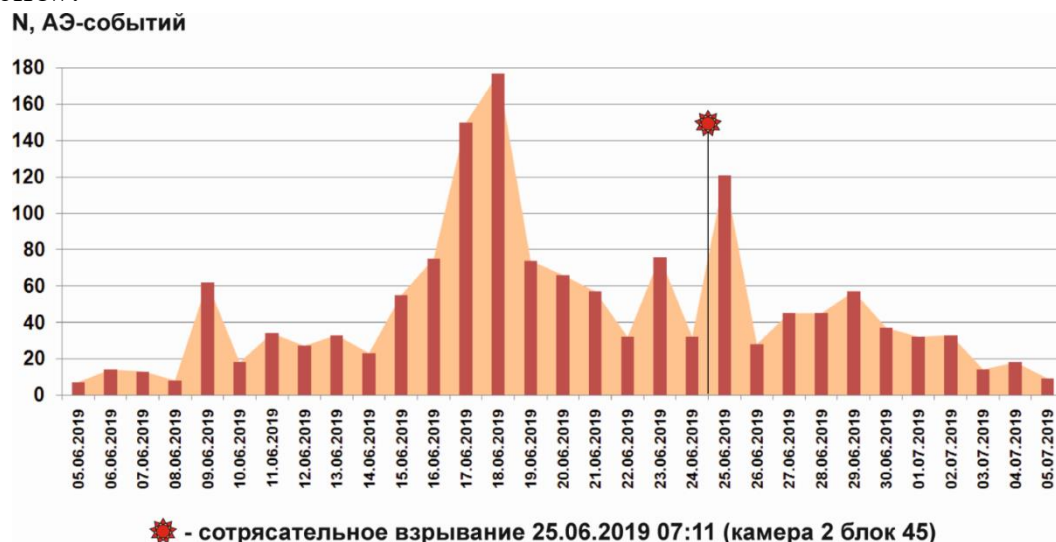


Рисунок 4.2.8 – График изменения акустической активности до и после проведения сотрясательного взрыва 25.06.2019, 07:11

Таким, образом, использование предложенных в экспериментальном порядке дополнительных специальных профилактических мероприятий локального характера (бурение разгрузочных скважин и камуфлетное или сотрясательное взрывание зарядов ВВ) позволяет повысить безопасность ведения горных работ в условиях влияния геодинамически активных разломов и снизить уровень динамического риска при отработке Николаевского месторождения на глубине более 750м (ниже гор. –370м). Обоснованный комплекс эффективных профилактических мероприятий локального характера внедрен в Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях Николаевское и Южное (АО «ГМК «Дальполиметалл»), опасных по горным ударам (2018 г.) [126].

4.3. Выбор рекомендуемых мер безопасности. Типизация очистных блоков по степени их удароопасности

Полученные результаты изучения полей напряжений применительно к отработке очистных блоков рудных залежей «Восток-1» и «Харьковская» в условиях сложного напряжённого состояния массива и влияния геодинамически активных разломов целесообразно использовать для геомеханического обоснования выбора рекомендуемых мер безопасности и прагматической типизации очистных камер по степени их удароопасного состояния.

Итоговая оценка удароопасности участков массива в связи с геомеханическим состоянием очистных блоков, а также с учётом основных параметров локальной тектонической структуры приведена в сводной таблице 4.3.1.

Таблица 4.3.1 – Оценка влияния тектонической структуры на степень удароопасности очистных блоков рудной залежи «Восток-1»

Название очистного блока	Расположение относительно разлома ТН-3	Число зарегистрированных толчков за 2011-2020 гг.	Угол пересечения контуров блока с разломом ТН-3, град	Наличие высоких концентраций сжимающих напряжений	Степень удароопасности очистных блоков
Камера 1 блок Южный-1	На пересечении с разломом ТН-3	1	90	В краевых частях камеры	Средняя
Камера 2 блок Южный-1	На пересечении с разломом ТН-3	6	От 45 до 75	На пересечении с разломом ТН-3 (гор. - 406) и в зоне опорного давления отработанных камер	Высокая
Камера 1 блок Южный-2	За пределами разлома	-	-	В краевых частях камеры	Низкая
Камера 2 блок Южный-2	За пределами разлома	-	-	В краевых частях камеры	Низкая
Камера 3 блок Южный-2	За пределами разлома	-	-	В краевых частях камеры	Низкая
Блок 40	На пересечении с разломом ТН-3	4	45	На пересечении с разломом ТН-3	Высокая
Блок 45	На пересечении с разломом ТН-3	6	От 45 до 90	На пересечении с разломом ТН-3	Высокая

По результатам анализа полученных данных очистные блоки рудной залежи «Восток-1» Николаевского месторождения разделены на 3 группы по степени

удароопасности:

1. Низкая степень удароопасности. К данной группе относятся все очистные блоки, расположенные за пределами разлома ТН-3 (камеры 1, 2 и 3 блока Южный-2). Низкая степень их удароопасности подтверждается как результатами сейсмоакустического мониторинга, так и результатами моделирования (таблица 4.3.1).

2. Средняя степень удароопасности. К данной группе относятся все очистные блоки, расположенные на пересечении с разломом ТН-3. При этом контуры отбойки рудного тела должны составлять угол, близкий к 90 градусов, но не менее $57-71^\circ$ (в зависимости от типа пород, рисунок 3.4.8). К средней категории удароопасности относится камера 1 блока Южный-1, контуры которой расположены под углом 90 градусов к разлому ТН-3. За период с 2011 по 2020 год в районе этого блока зарегистрирован 1 толчок (таблица 4.3.1).

3. Высокая степень удароопасности. К данной группе можно отнести все очистные блоки, расположенные на пересечении с разломом ТН-3 под углом менее $57-71^\circ$. Сюда относятся камера 2 блока Южный-1, а также очистные блоки 40 и 45, в районе которых за период с 2011 по 2020 год суммарно зарегистрировано 16 толчков (таблица 4.3.1).

Блок-схема разработанной для Николаевского месторождения типизации очистных блоков по степени их удароопасности представлена на рисунке 4.3.1.



Рисунок 4.3.1 – Блок-схема типизации очистных блоков по степени их удароопасности (величина угла условно принята для массива известняка)

Разработанная типизация очистных блоков может быть использована для заблаговременной оценки потенциальной удароопасности камер до начала их отработки и, с учётом этого, – для выбора комплекса необходимых геомеханических мероприятий регионального и локального уровня для обеспечения безопасности горных работ (таблица 4.3.2).

Таблица 4.3.2 – Разработанная для Николаевского месторождения типизация очистных блоков по степени их удароопасности и список рекомендуемых мер безопасности при их отработке

Меры безопасности	Типизация очистных блоков по степени их удароопасности (величина угла условно принята для массива известняка)		
	Низкая степень удароопасности (очистной блок расположен за пределами разлома ТН-3)	Средняя степень удароопасности (очистной блок пересекается с разломом ТН-3 под углом более 57°)	Высокая степень удароопасности (очистной блок пересекается с разломом ТН-3 под углом более 57°)
Заблаговременное выявление напряженных участков массива горных пород комплексным методом (с использованием методов ДЗЗ, математического моделирования НДС, АСКГД «Prognoz-ADS» и «Prognoz-S», локального прибора «Prognoz-L» и др. методов).	+	+	+
Трассировка подготовительных выработок под отработку очистного блока под углом 45° к направлению максимальных сжимающих напряжений	+	+	+
Необходимость проектного планирования и обеспечения перпендикулярности контуров отработки полублоков по отношению к разлому ТН-3 процессе отработки очистного блока	–	+	+
Разгрузка остроугольных целиков, образованных на пересечении разлома ТН-3 с очистным блоком до начала его отработки	–	–	+
Приоритетность порядка отработки очистного блока	В третью очередь	Во вторую очередь	В первую очередь
Использование выборочной закладки камер твердеющими смесями	–	+	+
Бурение строчки вертикальных разгрузочных скважин в кровле надштрековых целиков на нижележащем горизонте до начала отработки очистного блока	+	+	+
Проведение сотрясательного взрывания при выявлении акустически активной зоны (ААЗ) системой «Prognoz-ADS» в непосредственной близости от отрабатываемого очистного блока до начала или в процессе его отработки	+	+	+

Предложенный комплекс мер безопасности (противоударные мероприятия и технологические решения) внедрён в “Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях Николаевское и Южное (АО “ГМК “Дальполиметалл”), опасных по горным ударам” (2018 г.) [126].

Ожидается и частично подтверждено экспериментальными работами в производственных условиях, что использование разработанных и рекомендованных технических и технологических решений регионального и локального характера в полной мере обеспечит в дальнейшем повышение безопасности горных работ и снижение геодинамического риска при интенсивной крупномасштабной отработке удароопасного Николаевского месторождения в условиях влияния геодинамически активных разломов и на глубинах более 750 м (ниже гор. –370 м).

Выводы по главе 4:

1. Для условий отработки нижней части Николаевского месторождения на глубине более 600 м (ниже гор. –220 м) разработан и геомеханически обоснован вариант трассировки блоковых горизонтальных подготовительных выработок под углом 45° к направлению максимальных сжимающих напряжений; данным решением обеспечивается снижение максимального уровня напряжений в кровле выработок на 12–14 %; такая ориентировка выработок целесообразна также с точки зрения их расположения по отношению к тектоническому разлому ТН-3; в целом параллельно-перпендикулярное расположение выработок относительно разлома ТН-3 обеспечивает исключение высоких концентраций сжимающих напряжений на пересечениях разлома подготовительными выработками.

2. Для тех же условий отработки глубоких горизонтов показана необходимость ориентирования контуров очистных блоков перпендикулярно разломным структурам; контуры очистных камер также должны быть им перпендикулярны, при невозможности же реализации данной меры предлагается до начала отработки блока производить разгрузку либо первоочередную отработку остроугольных целиков с целью образования прямого угла между очистной

камерой и разломными структурами; использование данного технологического решения исключает высокие концентрации сжимающих напряжений на пересечении очистного пространства с элементами тектонической структуры, сокращая предпосылки к динамическим проявлениям горного давления; по тем же обоснованиям предлагается в первую очередь осуществлять отработку удароопасных блоков, расположенных на пересечении с разломом ТН-3 и только после этого рекомендуется осуществлять отработку смежных к ним камер, расположенных за пределами разлома ТН-3.

3. В качестве дополнительной и крайней меры безопасности предлагается рассматривать возможность реализации с необходимым технико-экономическим обоснованием технического решения по выборочной закладке твердеющими смесями выработанных пространств, расположенных на пересечении с разломом ТН-3, в районе которого в последние годы наблюдается рост регистраций проявлений техногенной сейсмичности.

4. Снижение опасных концентраций в межэтажных целиках оказывается возможным обеспечивать путем заблаговременного бурения вертикальных разгрузочных скважин в кровле подготовительных выработок. Оптимальное расстояние между скважинами для образования разгрузочной щели существенно зависит от направления ориентировки выработки по отношению к главным напряжениям. Для создания защитной зоны расстояние между скважинами для предложенного варианта трассировки подготовительных выработок под отработку очистного блока (расположенных под углом 45° к направлению максимальных сжимающих напряжений) должно составлять $1.5 \div 3$ диаметра скважины.

5. Разгрузка удароопасных участков массива горных пород и приведение их в неудароопасное состояние в условиях глубоких горизонтов могут производиться с использованием апробированного в экспериментальном порядке на Николаевском месторождении методом сотрясательного взрывания скважин (см. раздел 4.2), выполненным в соответствии с установленным порядком производства взрывных работ; последующую оценку эффективности выполненных мероприятий целесообразно осуществлять с помощью визуальных наблюдений, а также непрерывного геомеханического мониторинга с помощью геоакустической

системы контроля горного давления «Prognoz-ADS» и прибора локального контроля «Prognoz-L» по методике, разработанной в ИГД ДВО РАН.

6. Допустимый уровень безопасности горных работ на глубоких горизонтах Николаевского месторождения может быть обеспечен с использованием метода оперативного выявления зон опасных концентраций напряжений на участках активных разломов и высоконапряженного сложноструктурного массива горных пород (в пределах выявленных акустически активных зон) и с использованием метода направленного управления геомеханическими процессами; для обоснования состава и параметров комплекса противоударных мероприятий целесообразно учитывать заблаговременно полученные результаты численного моделирования НДС разрабатываемого массива горных пород, а также результаты сейсмоакустического мониторинга, осуществляемого в режиме реального времени в процессе ведения горных работ.

7. Прогнозирование геомеханической обстановки может выполняться по предлагаемой разработанной методике, согласно которой очистные блоки (в частности, – по рудной залежи «Восток-1») разделяются на 3 категории по степени прогнозируемой удароопасности; к категории с низкой степенью удароопасности отнесены камеры, расположенные за пределами разломных структур; к категориям высокой и средней степени удароопасности отнесены очистные блоки, расположенные на пересечении с разломом ТН-3 под углом менее и более 57° , соответственно; разработанная типизация очистных блоков предлагается для заблаговременной оценки потенциальной удароопасности выемочных единиц и обоснованного выбора комплекса геомеханических мер безопасности.

8. Обоснованный комплекс мер безопасности и рекомендаций по управлению горным давлением использован при разработке «Указаний по безопасному ведению горных работ на месторождениях Николаевское и Южное (АО «ГМК «Дальполиметалл»), опасных по горным ударам (2018 г.) и учитывается при проектировании и ведении горных работ на удароопасных участках месторождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе выявленных факторов удароопасности, натурных измерений акустической эмиссии, математического моделирования распределения напряжений в массиве горных пород получены закономерности геомеханических процессов, а также разработаны и научно обоснованы противоударные технологические и организационно-технические решения, имеющие существенное научное и практическое значение для дальнейшего освоения глубоких горизонтов удароопасного Николаевского полиметаллического месторождения.

Основные научные положения и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Отработка глубинной части месторождения сопровождается появлением и активизацией акустически активных зон, регистрируемых вдоль разломных структур и на пересечении с контуром олистолита известняков; выделение этих зон позволяет повысить эффективность и оперативность процесса управления горным давлением.

2. Удароопасность и техногенная сейсмичность глубинной части месторождения в значительной степени (в 91% случаев регистрации толчков) определяется развитием геодинамических процессов с увеличением объемов добычи в районе геодинамически активного тектонического разлома ТН-3 и восточной границы олистолита известняков, являющихся главными элементами техногенной трансформации геодинамической системы месторождения и определяющих направление ее активизации в современный период.

3. По результатам численного моделирования отработки глубинной части месторождения прогнозируется высокая концентрация напряжений (до 140 МПа), предопределяемая установленными геомеханическими факторами: морфологией контура олистолита известняков и положением очистных блоков относительно геодинамически активного разлома ТН-3; наиболее удароопасными элементами камерной системы разработки с управляемым обрушением кровли являются целики в приразломной зоне на участках крутого поднятия поверхности

тела олистолита; снижение удароопасности в высоконапряженных участках обеспечивается путём расположения очистных камер под углом более $57-71^\circ$ к разлому ТН-3.

4. Моделированием условий отработки рудных залежей «Восток-1» и «Харьковская» выявлена возможность возникновения недопустимо высоких концентраций горизонтальных сжимающих напряжений в некоторых конструктивных элементах системы разработки (в краевых частях камер, межблоковых целиках и кровле горных выработок); установленные зависимости уровня максимальных напряжений от глубины отработки и ориентировки элементов очистного пространства относительно направления действия максимальных сжимающих напряжений и разлома ТН-3 использованы для разработки противоударных технологических решений.

5. Рекомендуемый для глубоких горизонтов месторождения комплекс противоударных организационно-технических мер и технологических решений (включающий ориентировку блоковых подготовительных выработок и очистных камер, последовательность их отработки, управляемую разрядку сотрясательным взрыванием и скважинной разгрузкой) выбирается по разработанным алгоритму и схеме типизации очистных блоков по степени потенциальной их удароопасности.

6. Необходимый уровень геомеханической безопасности на глубоких горизонтах месторождения обеспечивается предложенными составом и параметрами комплекса противоударных мероприятий и рекомендаций, базирующихся на результатах заблаговременно выполняемого численного моделировании напряжённо-деформированного состояния массива и сейсмоакустического мониторинга, осуществляемого по разработанной методике в режиме реального времени в процессе ведения горных работ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авершин, С. Г. Горные удары / С. Г. Авершин. – М: Углетехиздат, 1955. – 235 с.
2. Адушкин, В. В. Новый подход к мониторингу техногенно-тектонических землетрясений / В. В. Адушкин, С. Б. Кишкина, Г. Г. Кочарян // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 3-14.
3. Адушкин, В. В. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная / В. В. Адушкин, С. Б. Турунтаев – М.: ИГД РАН, 2015. – 364 с.
4. Айтматов, И. Т. Методы и результаты изучения напряженного состояния массивов и создание на их основе эффективных способов управления горным давлением при подземной разработке руд / И. Т. Айтматов, В. И. Ахматов [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1987. – № 4.
5. Аникин, П. А. Оценка геомеханического состояния удароопасного массива горных пород по результатам геоакустического мониторинга на месторождении "Антей" / П. А. Аникин // Проблемы недропользования: материалы VI Всероссийской молодежной научно-практической конференции (8-10 февр. 2012 г.). - Екатеринбург: УрО РАН. - 2012. - С. 421-431.
6. Ардашев, К. А. Методы и приборы для исследования проявлений горного давления: справочник / К.А. Ардашев, В.И. Ахматов, Г.А. Катков. – М.: Недра, 1981. – 128 с.
7. Батугин, А. С. Новые формы проявления геодинамической опасности на горных предприятиях / А.С. Батугин, И.М. Ватутина, И.В. Головкин, В.А. Семенов, Юй Лицзян, Цяо Цзяньюн, Чжао Цзинли, Ван Чжицян, Чжан Хунвэй, Лань Тяньвэй // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – С. 234-246.
8. Батугин, А. С. Техногенные землетрясения как часть тектонического процесса в зонах предельно напряженного состояния земной коры / А. С. Батугин // Горный журнал. - 2020. - № 1. - С. 24-27.
9. Батутина, И. М. Геодинамическое районирование месторождений при

проектировании и эксплуатации рудников / И. М. Батугина, И. М. Петухов. – М.: Недра, 1988. – 166 с.

10. Батугина, И. М. Каталог горных ударов на зарубежных месторождениях. Деп. рукопись. 1978.

11. Батугина, И. М. Методические указания по профилактике горных ударов с учетом геодинамики месторождения / И.М. Батугина, И.М. Петухов, Ш.Б.Винокур [и др.] – Л.: ВНИМИ, 1983. – 118 с.

12. Батугина, И. М. О геодинамическом районировании месторождения Бейпяпо / И.М. Батугина [и др.] // Второй международный симпозиум по современным технологиям добычи угля: доклады. – Фuzин. КНР, 1993. – С. 274-277.

13. Барышников, В. Д. К вопросу оценки состояния пород по дискованию керна / В. Д. Барышников, К. В. Пирля, М. М. Мышакин. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1988. – С. 98-103.

14. Барышников, В. Д. Геомеханическое обоснование размещения нарезных и очистных выработок при восходящей системе отработки подкарьерных запасов рудника «Айхал» / В. Д. Барышников, Л. Н. Гахова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2008. – № 2. – С. 47–55.

15. Барышников, В. Д. О напряженно-деформированном состоянии Николаевского месторождения / В. Д. Барышников, М. В. Курленя, А. В. Леонтьев [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 1982. № 2. - С. 3-11.

16. Барышников, В. Д. Результаты исследований физико-механических свойств горных пород Николаевского месторождения / В. Д. Барышников, К. В. Пирля, И. П. Шумский // Физические свойства горных пород. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1982. – С. 131-135.

17. Барях, А. А. Геомеханическое обоснование отставания очистных работ при одновременной отработке смежных панелей / А. А. Барях [и др.] // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2010. – № 1. – С. 25-28.

18. Беспалов, Н. А. Комплексный геодинамический мониторинг при разработке месторождения Антей, опасного по горным ударам / Н. А. Беспалов, А. В. Гладырь // Горный журнал. - 2020. - № 1. - С. 87-90.

19. Богайчук, А. В. Методы визуальных и инструментальных геомеханических наблюдений на рудниках Талнахского рудного узла / А. В. Богайчук, М. А. Осиян // Горный журнал. – 2008. – № 11. – С. 32-35.
20. Вернигор, В. М. Предупреждение горных ударов и внезапных выбросов в горнодобывающей промышленности / В.М. Вернигор, В.Б. Кульчицкий // Горная промышленность. – 2006. – № 4. – С. 4-8.
21. Верхованцева, Т. В. Изучение влияния закладочных работ на сейсмический режим калийных рудников / Т. В. Верхованцева, Р. А. Дягилев // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2016. - № 12, С. 115-123.
22. Верхованцева, Т. В. О влиянии закладки на техногенную сейсмичность в калийных рудниках // Сборник научных материалов XVII Уральской молодежной научной школы по геофизике. – 2016. - С. 40-43.
23. Виноградов, Ю. А. Современная сейсмичность на территории Мурманской области и её проявление в горнопромышленных зонах / Ю. А. Виноградов, В. Э. Асминг, Е. О. Кременецкая // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 1. – С. 62-70.
24. Винокур, Б. Ш. Горные удары: предотвращение и прогнозирование / Б. Ш. Винокур // Безопасность труда в промышленности. – 1997. – № 5. – С. 48.
25. Войтецкий, Л. Сравнение сейсмических эффектов, возникающих при различных видах взрывных работ при отработке угольного пласта длинным забоем / Л. Войтецкий, И. Голда // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 6. – С. 78-92.
26. Голик, В. И. Геологические методы исследования массивов / В. И. Голик [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 3. – С. 89-93.
27. Дорошенко, В. И. К проблеме горных ударов на Южном месторождении / В. И. Дорошенко, А. В. Антипов, Ю. Ю. Пиленков // Горный журнал. – 1994. – № 3. – С. 56-61.
28. Дорошенко, В. И. Об удароопасности Николаевского месторождения / В. И. Дорошенко, А. М. Фрейдин, М. С. Гусев, Ю. Д. Науменко // Горный журнал. – 1990. - №1. – С. 49-51.
29. Егоров, П. В. Некоторые особенности проявления горных ударов и

методы борьбы с ними / П. В. Егоров, А. А. Еременко, Ю. А. Шевелев // Горный журнал. – 1989. - №10. – С. 50-53.

30. Емельянов, Б. И. Геомеханика: учеб. пособие / Б. И. Емельянов, В. Н. Макишин. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2008. – 339 с.

31. Ерёменко, А. А. Геодинамические и сейсмические явления при обрушении блоков на удароопасных месторождениях Горной Шории / А. А. Ерёменко, И. В. Машуков, В. А. Ерёменко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 70-76.

32. Еременко, А. А. О горно-тектоническом ударе на Таштагольском месторождении / А. А. Еременко [и др.] // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2001. – С. 293-296.

33. Еременко, В. А. Опыт отработки разрезного блока на Восточном участке Таштагольского месторождения / В. А. Еременко [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 5. – С. 196-199.

34. Ерёменко, А. А. Оценка геомеханического состояния массива горных пород при отработке двух сближенных рудных тел на Шерегешевском месторождении. / А. А. Ерёменко, Л. Н. Гахова, А. И. Конурин и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2018. - № 1, С. 67-75.

35. Еременко, В. А. Природные и техногенные факторы возникновения горных ударов при разработке железорудных месторождений / В. А. Еременко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 10. – С. 50-59.

36. Жирнов, А. А. Геомеханическая оценка горнотехнической ситуации на Иртышском месторождении и обоснование параметров систем разработки / А. А. Жирнов, Ю. Н. Шапошник, А. М. Никольский, С. А. Неверов // Горный журнал. - 2018. - № 1. - С. 48-53.

37. Жиров Д. В. Выделение факторов контроля геодинамических опасностей на примере 3D геолого-структурной модели природно-технической системы «рудник Расвумчоррский – карьер Центральный» (Хибины) / Д. В. Жиров, С. А. Климов, А. В. Пантелеев, А. М. Жирова // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2016. - № 7, С. 200-226.

38. Зотеев, О. В. Научные основы расчета конструктивных параметров систем подземной разработки руд с учетом структуры: дисс. д-ра техн. наук / О. В.

Зотеев; УГГГА. – Екатеринбург, 1999. – 261 с.

39. Инструкция по безопасному ведению горных пород на рудниках и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам (РД 06-329-99) / Колл. авторов. – М.: ГП НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000. – 66 с.

40. Казикаев Д. М. Геомеханика подземной разработки руд. – М.: Изд-во МГГУ, 2009.

41. Казикаев, Д. М. Особенности геомеханических процессов и управление ими при совместной разработке месторождений / Д. М. Казикаев // Горный журнал. – 1986. – № 8. – С. 55-58.

42. Козырев, А. А. Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике 09.01.2018 / А. А. Козырев, И. Э. Семенова, О. Г. Журавлева, А. В. Пантелеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2018. - № 12, С. 74-83.

43. Козырев, А. А. Изменение геодинамического режима и проявление техногенной сейсмичности при ведении крупномасштабных горных работ на апатитовых рудниках в Хибинском массиве / А. А. Козырев [и др.] // Проблемы геодинамической безопасности: международное рабочее совещание (24-27 июня 1997 г.). – СПб.: ВНИМИ, 1997. – С. 66-71.

44. Козырев, А. А. Изменение геодинамического режима и проявление техногенной сейсмичности при ведении крупномасштабных горных работ на апатитовых рудниках в Хибинском массиве / А. А. Козырев [и др.] // Проблемы геодинамической безопасности: международное рабочее совещание (24-27 июня 1997 г.). – СПб.: ВНИМИ, 1997. – С. 66-71.

45. Козырев, А. А. Мониторинг состояния подземных горных выработок по данным лазерного сканирования / А.А. Козырев, В.В. Тимофеев, К.Н. Константинов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 2. – С. 134-140.

46. Козырев, А. А. О геодинамической безопасности горных работ в удароопасных условиях на примере Хибинских Апатитовых месторождений / А. А. Козырев, В. И. Панин, И. Э. Семёнова, О. Г. Журавлёва // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 5. – С. 78-92.

47. Колтышев, В. Н. Особенности отработки рудных участков технологией с закладкой выработанного пространства в удароопасных условиях. / В. Н. Колтышев, О. В. Шипеев, В. Н. Филиппов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2017. - № 8, С. 107-112.
48. Козырев, А. А. Сильнейшее техногенное землетрясение на руднике «Умбозеро»: горнотехнические аспекты / А. А. Козырев [и др.] // Горный журнал. – 2002. – № 1. – С. 43-49.
49. Коликов, К. С. Закладка выработанного пространства как способ снижения негативного экологического воздействия при подземной угледобыче / К. С. Коликов, И. Э. Мазина, А. Г. Урузбиева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. - № 5. – С. 252-259.
50. Котиков, Д. А. Установление связи между распределением сейсмособытий в массиве горных пород и его тектоническим строением / Д. А. Котиков, А. Н. Шабаров, С. В. Цирель // Горный журнал. - 2020. - № 1. - С. 28-32.
51. Константинов, А. В. Идентификация сейсмоакустических сигналов средствами локального мониторинга / А. В. Константинов [и др.] // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. - 2019. - Т. 6, № 3. - С. 254-267.
52. Кузнецов, Г. А. Методы и средства решения задач горной геомеханики / Г. Н. Кузнецов, К. А. Ардашев, Н. А. Филатов и др. – М.: Недра, 1987. – 248 с.
53. Курленя, М. В. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения горных пород / М. В. Курленя [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. - 2000.
54. Курленя, М. В. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород / М. В. Курленя, В. Н. Опарин. – Новосибирск: Наука, 1999.
55. Кутузов, Б. Н. Разгрузка удароопасных внутриблоковых целиков в районе активных тектонических разломов с использованием энергии взрыва / Б. Н. Кутузов, В. Н. Тюпин // Горный журнал. - 2018. - № 1. - С. 54-57.
56. Лань, Тяньвэй. Исследование энергии системы горных ударов при подземной глубокой разработке на угольной шахте / Лань Тяньвэй, Чжан Хунвэй, И. М. Батугина, Юй Лицзян, Ли Шен, Хан Цзюнь, Сун Вэйхуа, Тан Гошуй //

Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №6. – С. 287-293.

57. Ляшенко, В. И. Развитие научно-методических основ мониторинга состояния массива сложноструктурных месторождений / В. И. Ляшенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2017. - № 2, С. 109-135.

58. Макаров, А. Б. Практическая геомеханика. Пособие для горных инженеров / А. Б. Макаров. – М.: Изд-во «Горная книга», 2006. – 391 с.

59. Мансуров, В. А. Некоторые закономерности образования полей напряжений и разрывов в геологических структурах / В. А. Мансуров, И. С. Языков // Прогноз землетрясений. – М., 1982.

60. Марысюк В. П. Влияние флексуры на сейсмическую активность на шахте «Скалистая» / В. П. Марысюк, О. В. Ситникова, С. В. Цирель, С. Н. Мулёв // Горный журнал. - 2016. - № 7. - С. 19-22.

61. Марысюк В. П. Совершенствование способов разгрузки массива скважинами большого диаметра при отработке сульфидных руд / В. П. Марысюк, В. И. Корнейчук, С. Н. Фендер, А. А. Андреев, А. С. Корецкий // Горный журнал. - 2014. - № 4. - С. 15-18.

62. Мельников, Н. Н. Комплексная многоуровневая система геомониторинга природно-технических объектов горнодобывающих комплексов / Н. Н. Мельников, А. И. Калашник, Н. А. Калашник, Д. В. Запорожец // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 4. – С. 3-10.

63. Методы и системы сейсмодеоформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – Т. 1; 2010. – Т. 2.

64. Морозов, В. Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния и геодинамическое районирование в сейсмически активных районах / В. Н. Морозов, А. И. Маневич, В. Н. Татаринцов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2018. - № 8, С. 123-132.

65. Морозов, Е. М. Метод конечных элементов в механике разрушений / Е. М. Морозов, Г. П. Никишков. – М.: Наука, 1980. – 256 с.

66. Нестеренко, Г. Т. Приближенный метод оценки напряженного состояния горных пород / Г. Т. Нестеренко, А. Т. Шаманская, П. В. Егоров. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1970. – 133 с.

67. Никольский, А. М. Геомеханическая оценка напряженного состояния убывающего целика при подходе очистного забоя к демонтажной камере / А. М. Никольский // Уголь. – 2009. – № 6, С. 49-51.

68. Овчаренко, О. В. Исследование удароопасности массива горных пород месторождения «Морошка», отрабатываемого системой разработки с закладкой выработанного пространства / О. В. Овчаренко, И. И. Айнбиндер, П. Г. Пацкевич // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2018. - № 8, С. 5-15.

69. Опарин, В. Н. О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников «Октябрьский» и «Таймырский» Норильского месторождения в 2003 г. Ч. I: Сейсмический режим / В. Н. Опарин [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2004. – № 4. – С. 3-22.

70. Опарин, В. Н. Об аналитическом описании форм поверхности подземной камеры при взрывах зарядов по данным лазерного сканирования / В. Н. Опарин, В. Ф. Юшкин, В. К. Климко, Д. Е. Рублёв // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 4. – С. 183-196.

71. Оценка удароопасности массивов горных пород Николаевского и Южного месторождений АО «ГМК «Дальполиметалл»: Отчет о НИР / Рук. И.Ю. Рассказов. – Хабаровск: ИГД ДВО РАН, 2019. – 59 с.

72. Петухов И. М. Геодинамика недр / И. М. Петухов, И. М. Батугина – М.: Недра, 1996. – 217 с.

73. Петухов, И. М. Геофизические исследования горных ударов / И. М. Петухов [и др.]. – М.: Недра, 1975. – 136 с.

74. Петухов, И. М. Горные удары на угольных шахтах / И. М. Петухов. – М.: Недра, 1972. – 221 с.

75. Петухов, И. М. Механика горных ударов и выбросов / И. М. Петухов, А.М. Линьков. – М.: Недра, 1983. – 280 с.

76. Петухов, И. М. О предотвращении горных ударов на глубоких рудниках СССР / И. М. Петухов, П. В. Егоров, В. С. Шаталов // Безопасность труда в промышленности. – 1971. – № 10. – С. 5-7.

77. Петухов, И. М. Предотвращение горных ударов на рудниках / И. М. Петухов, П. В. Егоров, В. Ш. Винокур. – М.: Недра, 1984. – 231 с.

78. Петухов, И. М. Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов: справочное пособие / И.М. Петухов [и др.]. – М.: Недра, 1992. – 256 с.
79. Повзнер, М. Е. Геомеханика / М. Е. Повзнер, М. А. Иофис, В. Н. Попов. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГГУ, 2008. – 438 с.
80. Полухин В. А. Способ повышения устойчивости выемочных и магистральных горных выработок / В. А. Полухин, В. В. Скобликов // Вестник научного центра. - 2008. - № 2. - С. 113-117.
81. Потапчук, М. И. Геомеханические условия разработки рудной залежи "Восток-1" Николаевского месторождения / М. И. Потапчук, И. Ю. Рассказов, Г. М. Потапчук, А. В. Сидляр // Проблемы безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях: материалы научно-практической конференции, посвященной 25-летию Горного института УрО РАН - Пермь, 2014. - С. 321-325
82. Потапчук М.И. Геомеханические условия разработки рудной залежи "Восток-1" Николаевского месторождения / М. И. Потапчук, И. Ю. Рассказов, Г. М. Потапчук, А. В. Сидляр // Проблемы безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях: материалы научно-практической конференции - Пермь, 2014. - 2014. - С. 321-325.
83. Потапчук, М. И. Повышение безопасности подземной отработки месторождений сложной тектонической структуры / М. И. Потапчук, Г. А. Курсакин // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2016. - спец. вып. № 21: Проблемы комплексного освоения георесурсов. - С. 120-131
84. Потемкин, Д. А. Моделирование процессов сдвижения массива горных пород при нисходящем порядке отработки рудного тела Яковлевского месторождения / Д. А. Потемкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 5. – С. 137-141.
85. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках. / Под ред. И. М. Петухова, А. М. Ильина, К. Н. Трубецкого. – М.: Изд-во АГН, 1998. – 376 с.
86. Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам, утвержденному приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору №576 от 2 сентября 2013 г. [Электронный ресурс]. – <http://docs.cntd.ru/document/499086982>

87. Развитие научно-методических основ и технических средств геомеханического мониторинга и диагностики состояния массива горных пород для снижения риска природных и техногенных катастроф при освоении недр Дальнего Востока: отчет о НИР (заключительный) / ФГБУН Институт горного дела ДВО РАН; рук. Рассказов И.Ю. – Хабаровск, 2017. – 114 с. – № ГР 115020410157.

88. Рассказов, И. Ю. Акустический измерительно-вычислительный комплекс для геомеханического мониторинга массива пород при ведении горных работ / И. Ю. Рассказов [и др.] // Физическая акустика. Распространение и дифракция волн. Геоакустика: сб. тр. XVI сессии Российского акустического общества. – М.: ГЕОС, 2005. – Т. 1. – С. 351-354.

89. Рассказов, И. Ю. Алгоритм выделения потенциально удароопасных зон в разрабатываемом массиве горных пород по результатам сейсмоакустического мониторинга / И. Ю. Рассказов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 12, вып. 5: Проблемы освоения георесурсов Дальнего Востока. – С. 31-39.

90. Рассказов, И. Ю. Анализ условий активизации геодинамических процессов и проявления техногенной сейсмичности на подземных рудниках дальневосточного региона / И. Ю. Рассказов [и др.] // Триггерные эффекты в геосистемах: тезисы докладов V Междунар. конф. (Москва, 4–7 июня 2019 г.). - М. - 2019. - С. 166–167

91. Рассказов, И. Ю. Геодинамический полигон Стрельцовского рудного поля: практика и перспективы / И. Ю. Рассказов, В. А. Петров, А. В. Гладырь, Д. В. Тюрин // Горный журнал. – 2018. – № 7. – С. 17-21.

92. Рассказов, И. Ю. Геодинамическое состояние массива пород Николаевского полиметаллического месторождения и особенности проявления удароопасности при его освоении / И. Ю. Рассказов, Б. Г. Саксин, В. И. Усиков, М. И. Потапчук // Горный журнал. 2016. № 12. С. 13-19.

93. Рассказов, И. Ю. Геомеханическая оценка технологии отработки участка рудной залежи "Восток-1" Николаевского месторождения / И. Ю. Рассказов, М. И. Потапчук, А. В. Сидляр // Геомеханика в горном деле: доклады международной конференции (12-14 октября 2011 г.). - Екатеринбург: ИГД УрО РАН. - 2012. - С. 68-73

94. Рассказов, И. Ю. Геомеханические условия и особенности динамических проявлений горного давления на месторождении Антей / И. Ю. Рассказов, Б. Г. Саксин, В. А. Петров, Б. А. Просекин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2012. - № 3. - С. 3-13

95. Рассказов, И. Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона / И. Ю. Рассказов. – М.: Изд-во «Горная книга», 2008. – 329 с.

96. Рассказов, И. Ю. Особенности регистрации и обработки данных геоакустического контроля массива горных пород на действующем руднике / И. Ю. Рассказов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 8. – С. 212-218.

97. Рассказов, И.Ю. Особенности сейсмоакустического контроля геомеханического состояния массива горных пород в геодинамически активных районах / И. Ю. Рассказов, Г. А. Курсакин // Известия вузов. Горный журнал. – 2006. – № 6. – С. 22-28.

98. Рассказов, И. Ю. Особенности формирования техногенного поля напряжений при отработке глубоких горизонтов Николаевского месторождения / И. Ю. Рассказов, М. И. Потапчук [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2013. - № 12, спец. вып. 4: Проблемы освоения георесурсов Дальнего Востока. - С. 97-106

99. Рассказов, И. Ю. Перспективные методы и средства сейсмоакустического контроля опасных проявлений горного давления при подземном освоении недр / И. Ю. Рассказов [и др.] // Проблемы формирования и освоения минерально-сырьевых ресурсов Дальнего Востока. – Хабаровск : ИГД ДВО РАН, 2004. – С. 185-191.

100. Рассказов, И. Ю. Прогнозная оценка удароопасности массива горных пород при отработке глубоких горизонтов Николаевского месторождения / И. Ю. Рассказов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2012. - № 4. - С. 96-102

101. Рассказов, И. Ю. Совершенствование технических средств локального контроля удароопасности при ведении горных работ в сложных горногеологических условиях / И. Ю. Рассказов [и др.] // Горный информационно-

аналитический бюллетень. - 2014. - № 12, спец. вып. 5 : Проблемы освоения георесурсов Дальнего Востока. - С. 22-30

102. Рассказов, И. Ю. Современное напряженно-деформированное состояние верхних уровней земной коры Амурской литосферной плиты / И. Ю. Рассказов, Б. Г. Саксин, В. А. Петров, Б. Ф. Шевченко, В. И. Усиков, Г. З. Гильманова // Физика Земли. – 2014. - №2. – С. 104-113.

103. Рогулина Л. И. Николаевское скарново-полиметаллическое месторождение (Приморье, Россия) / Л. И. Рогулина, О. Л. Свешникова // Геология рудных месторождений. – 2008. - №1. – С. 67-82.

104. Рубан, А. Д. Горная геофизика. Электрометрические методы геоконтроля. Ч. III. Высокочастотные электромагнитные методы: учеб. пособие / А. Д. Рубан, Ю. Н. Бауков, В. Л. Шкуратник. – М. : МГГУ, 2002. – 147 с.

105. Руководство по применению метода разгрузки для определения напряженного состояния в глубине горных массивов. – Л., 1960. – 15 с.

106. Рыльникова, М. В. Геомеханика: учебное пособие / М. В. Рыльникова, О. В. Зотеев. – М., 2003. – 240 с.

107. Саксин, Б. Г. Исследование процессов геомеханической самоорганизации природно-технических систем на удароопасных месторождениях Востока России / Б. Г. Саксин, И. Ю. Рассказов, Б. А. Просекин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 9. – С. 118-124.

108. Саксин, Б. Г. Принципы комплексного изучения современного напряженно-деформированного состояния верхних уровней земной коры Амурской литосферной плиты / Б. Г. Саксин, И. Ю. Рассказов, Б. Ф. Шевченко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. - №2. – С. 53-65.

109. Саксин, Б. Г. Пространственные особенности рудно-метасоматической системы Николаевского полиметаллического месторождения / Б. Г. Саксин // Проблемы комплексного освоения георесурсов: Материалы III международной научной конференции. Том IV. – Хабаровск, 2010 – С. 208-214.

110. Сапожникова, Е. Н. Структура Дальнегорского рудного узла – основа для восстановления его модели строения в период рудообразования / Е. Н. Сапожникова, Ю. К. Пустов // Геология рудных месторождений. – 1991. - № 5. - С.

69-79.

111. Селиванов, Д. А. Прикладная структурная геология для оценки устойчивости горных выработок и управления геотехническими рисками / Д. А. Селиванов // Горный журнал. - 2021. - № 1. - С. 54-57.

112. Семенова, И. Э. Геомеханическое обоснование отработки запасов глубокого горизонта в сложных горно-геологических и геодинамических условиях / И. Э. Семенова, И. М. Аветисян, А. В. Земцовский // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2018. - № 12, С. 65-73.

113. Сидляр, А.В. Геомеханическое обоснование мер безопасности при разработке Николаевского полиметаллического месторождения, опасного по горным ударам / А. В. Сидляр, М. И. Потапчук, А. А. Терешкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2017. - № 7. - С. 184-194.

114. Сидляр А. В. Обоснование параметров скважинной разгрузки массива горных пород Николаевского полиметаллического месторождения, опасного по горным ударам / А. В. Сидляр, М. И. Потапчук // Проблемы недропользования. - 2017. - № 1 (12). - С. 102-110.

115. Сидляр, А. В. Совершенствование программных средств моделирования напряженно-деформируемого состояния массива горных пород / А. В. Сидляр, А. А. Иванников, М. И. Рассказова, А. В. Гладырь // Идеи, гипотезы, поиск...: сб. статей по материалам науч. конф. аспирантов, соискателей и молодых исследователей. - Магадан: СВГУ, 2012. - Вып. 19. - С. 111-116

116. Сидоров, Д. В. Прогнозирование удароопасности тектонически нарушенного рудного массива на глубоких горизонтах Николаевского полиметаллического месторождения / Д. В. Сидоров, М. И. Потапчук, А. В. Сидляр // Записки Горного института. - 2018. - Т. 234. - С. 604-611.

117. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

118. Сосновская, Е. Л. Обоснование параметров подземной геотехнологии крутопадающих сближенных жил Новоширокинского месторождения / Е. Л. Сосновская [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 10. – С. 28-32.

119. Тарасов, Б. Г. Парадоксы прочности и хрупкости горных пород в

условиях сейсмических глубин / Б. Г. Тарасов // Горный журнал. - 2020. - № 1. - С. 11-17.

120. Тарасов, Б. Г. Веерных механизм динамических трещин сдвига как источник парадоксов прочности и хрупкости горных пород / Б. Г. Тарасов // Горный журнал. - 2020. - № 1. - С. 18-23.

121. Тезиев, Т. М. Управление горным давлением при подземной разработке рудных месторождений / Т. М. Тезиев, Т. Р. Тедеев // Достижения вузовской науки. – 2016. – № 23. – С. 139-149.

122. Техника контроля напряжений и деформаций в горных породах. – Л.: Наука, 1978. – 232 с.

123. Тимофеев, В. Ю. Натурный эксперимент по моделированию плитных движений // В. Ю. Тимофеев [и др.] // Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири. – Хабаровск, 2010. – С. 61-65.

124. Турчанинов, И. А. Геофизические методы исследования напряженного состояния горных пород / И. А. Турчанинов, В. И. Панин. – Л.: Наука, 1976. – 164 с.

125. Турчанинов, И. А. Основы механики горных пород / И. А. Турчанинов, М. А. Иофис, Э. В. Каспарьян. – Л. : Недра, 1989. – 488 с.

126. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях Николаевское и Южное месторождениях (АО «ГМК «Дальполиметалл»), опасных по горным ударам / И. Ю. Рассказов, Г. А. Курсакин, С. П. Осадчий, В. В. Попов и др. – Хабаровск: ИГД ДВО РАН, 2018. – 72 с.

127. Усиков, В. И. 3D-модели рельефа и строение верхней части земной коры Приамурья // Тихоокеанская геология. – 2011. – № 6. – С. 14–33.

128. Фадеев, А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

129. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам. - 2016. – 64 с.

130. Филиппов, В. Н. Прогноз и предупреждение геодинамических явлений при подготовке технологического блока к отработке на Таштагольском

месторождении. / В. Н. Филиппов, А. А. Еременко, А. Н. Александров и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2018. - № 5, С. 74-80.

131. Фрейдин, А. М. Геомеханическая оценка горнотехнической ситуации на золоторудном месторождении «Макмал» / А. М. Фрейдин, С. А. Неверов, А. А. Неверов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2009. – № 5. – С. 75–85.

132. Фрейдин, А. М. Повышение эффективности подземной разработки рудных месторождений Сибири и Дальнего Востока / А. М. Фрейдин [и др.]. – Новосибирск: Наука; СИФ, 1992. – 177 с.

133. Фрейдин, А. М. Устойчивость горных выработок при системах подэтажного обрушения / А. М. Фрейдин, С. А. Неверов, А. А. Неверов, П. А. Филиппов // ФТПРПИ. – 2008. – № 1.

134. Шабаров, А. Н. Концепция комплексного геодинамического мониторинга на подземных горных работах / А. Н. Шабаров, С. В. Цирель, К. В. Морозов, И. Ю. Рассказов // Горный журнал. – 2017. – № 9. – С. 59-64.

135. Шерман, С. И. Новые данные об активных разломах и зонах современной деструкции литосферы Приамурья / С. И. Шерман, А. П. Сорокин, А. Т. Сорокина, Е. А. Горбунова, В. А. Бормотов // Доклады Академии наук. 2010 – Т. 435. – № 5. – С. 685.

136. Шкуратник, В. Л. Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород / В. Л. Шкуратник, П. В. Николенко. – М. : Изд-во МГГУ, 2012. – 112 с.

137. Яковлев, Д. В. Закономерности развития и методика оперативной оценки техногенной сейсмической активности на горных предприятиях и в горнодобывающих регионах / Д. В. Яковлев, С. В. Цирель, С. Н. Мулев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. - № 2. – С. 34-47.

138. Ямщиков, В. С. Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов / В. С. Ямщиков. – М. : Недра, 1982. – 296 с.

139. Ямщиков, В. С. Измерение напряжений в массиве горных пород на основе эмиссионных эффектов памяти / В. С. Ямщиков, В. Л. Шкуратник, К. Л. Лыков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1990. – № 2. – С. 23-28.

140. Cook N. G. W. Origin of rockbursts // Rockbursts: prediction and control. – London: Institution of Mining and Metallurgy, 1984. – P. 1-9.
141. Cook N. G. W. The failure of rock. Int. J. RockMech. And Mining Sci. – 1965. – Vol. 2. – No 4. – P. 389-403.
142. Cook N. G. W., Hoek E., Pretorius I. P. G., Ortlepp W. D., Salamon M. D. J. Rockmechanics applied to the study of rockbursts // J. South Afric. Inst. Mining and Metallurgy. – 1966. – May. – P. 435-528.
143. Mendecki, A. J. Seismic monitoring in mines / A. J. Mendecki. – London: Chapman and Hall, 1997. – 193 p.
144. Rasskazov I., Lugovoy V., Tsoy D., Sidlyar A. The analysis of conditions of geodynamic process activation and manifestation of technogenic seismicity on underground mines of the Far East region // The 5th International Conference, Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences. – Moscow, 2019. – P. 379-386.
145. Reddy, C. D. Seismo-ionospheric anomalies and implications from recent GNCC observations in India and South-East Asia // Geodesy and Geodynamics 7 (1). – 2016. – pp. 11-18. doi: 10.1016/j.geog.2016.03.006
146. Riemer K. L., Durrheim R. J. Mining seismicity in the Witwatersrand Basin: monitoring, mechanisms and mitigation strategies in perspective // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2012. – Vol. 4(3). – pp. 228–249.
147. Salamon M. D. G. Rockburst hazard and the fight for its alleviation in South African gold mines // Rockbursts: prediction and control. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1984. – P. 11-36.
148. Sidliar A., Saksin B., Anikin P., Lomov M. The evaluation of the influence of tectonic structure of Nikolayevsky deposit on rock-burst hazard of rock mass // E3S Web of Conferences. - Vol. 56: VII International Scientific Conference “Problems of Complex Development of Georesources” (PCDG 2018), Russia, Khabarovsk, September 25-27, 2018.
149. Sidliar A., Saksin B., Potapchuk M., Usikov V., Lomov M. Analysis of activation features of geodynamic processes and formation of impact hazard at Nikolaevsk deposit // E3S Web of Conferences. - 2019. - Vol. 129: 1st International Scientific Conference “Problems in Geomechanics of Highly Compressed Rock and Rock

Massifs” (GHCRRM 2019), Vladivostok, Russia, July 15-22, 2019.

150. State administration of coal mine safety. Strengthen prevention and control rockburst symposium. 2013.05.10.

151. Shan-chao Hu, Yun-liang Tan, Jian-guo Ning, Wei-Yao Guo, Xue-sheng Liu Multiparameter Monitoring and Prevention of Fault-Slip Rock Burst // Shock and Vibration. – 2017. – China. – 2017. – Volume 2017, Article ID 7580109, 8 p.

152. Wang, H. Acoustic emission microseismic source location analysis for a limestone mine exhibiting high horizontal stresses / H. Wang, M. Ge // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2008. – Vol. 45. – Issue 5, July. – P. 720-728.

153. Zheqiang, S. Properties of dynamic rupture and energy partition in a solid with a frictional interface / S. Zheqiang, B. Z. Yehuda, A. Needleman // J. Mech. Phys. Solids. – 2008. – № 56. – P. 5-24.

154. Zhou K. P., Lin Y., Deng H. W., Li J. L., Liu C. J. Prediction of rockburst classification using cloud model with entropy weight // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – China. – 2016. – Vol. 26, Iss. 7. – pp. 1995-2002.

155. Zhu Qi-hu, Lu Wen-bo, Sun Jin-shan, Chen Ming. Prevention of rockburst by guide holes based on numerical simulations // Mining Science and Technology 19. – 2009. – p. 346 – 351.

156. Zienkiewicz O. C. The birth of the finite element method and of computational mechanics // Int. J. Numer. Meth.Eng. – 2004. – No 60. – pp. 3-10.