



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”

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Хабаровском Федеральном исследовательском центре Дальневосточного отделения Российской академии наук (ХФИЦ ДВО РАН)

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

Официальные оппоненты: **Зубков Альберт Васильевич**, доктор технических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук
Куранов Антон Дмитриевич, кандидат технических наук, заместитель директора Научного центра геомеханики и проблем горного производства Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

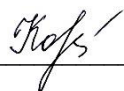
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский Федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится 12 октября 2021 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 999.101.03, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тихоокеанский государственный университет», Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», по адресу: 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51, конференц-зал. Тел./факс: +7(4212)32-79-27, e-mail: adm@igd.khv.ru

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

Автореферат разослан «_____» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук

 С.И. Корнеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последние годы разработка многих рудных месторождений России и мира сопровождается не только увеличением глубины отработки и объема выработанных пространств, но и вызванным этим ухудшением геодинамической обстановки, что приводит к возникновению опасных динамических проявлений горного давления в форме 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 сложилась на расположенном в Восточном Приморье России Николаевском полиметаллическом месторождении, на котором горные работы достигли глубины 800–850 м, а суммарный объем выработанных пространств превысил 4 млн. м³. Развитие деформационных процессов в результате обширной подработки массива горных пород и его структурная перестройка, 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 условий и 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-І-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 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 междукамерные 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 $57-71^\circ$ 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.).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования отражены в 32 опубликованных работах, в том числе в 11 работах в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 11 публикациях, входящих в базы данных WoS и Scopus и 3 свидетельствах на разработанные алгоритмы и программное обеспечение.

Объем и структура работы. Диссертация включает в себя введение, 4 главы, заключение, список литературы из 156 наименований, содержит 157 страниц текста, 83 рисунка и 11 таблиц.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю, чл.-корр. РАН, д-ру техн. наук Рассказову И.Ю., доктору геол.-минер. наук Саксину Б.Г., д-ру техн. наук Курсакину Г.А., 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приводится анализ современного состояния проблемы динамических проявлений горного давления на подземных рудниках, а также выполнен обзор известных методов и мер безопасности, позволяющих оценивать геомеханическое состояние массива горных пород и эффективно управлять горным давлением.

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, стрельня, 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.

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, регистрируются проявления техногенной сейсмичности.

Понимание механизма формирования горных ударов невозможно без изучения всех факторов, влияющих на удароопасность месторождений. 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 российские ученые С.Г. Авершин, И.М. Петухов, М.В. Курленя, К.Н. Трубецкой, В.Н. Опарин, А.А. Козырев, И.Ю. Рассказов, В.Н. Захаров, А.А. Еременко, О.В. Зотеев, В.С. Куксенко, А.В. Ловчиков, В.Н. Одинцев, А.Б. Макаров, В.В. Макаров, А.В. Зубков, А.Н. Шабаров и другие, а также иностранные исследователи Н.Г. Кук, М.Д.Г. Саламон, Ма Ч, Манчао Хэ и целый ряд других исследователей.

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 объемы 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.

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.

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.

В этой связи возникает необходимость исследования причин и факторов, определяющих удароопасность данного месторождения, а также необходимость разработки и научного обоснования мер геомеханической безопасности в процессе горных работ. Для решения этой актуальной научной проблемы были 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 на глубоких горизонтах Николаевского месторождения.

Вторая глава посвящена анализу горнотехнических, структурно-геологических и геомеханических условий разработки Николаевского месторождения, результатам исследований закономерностей проявления сейсмоакустической активности массива на его глубоких горизонтах и выявлению основных причин и факторов динамических проявлений горного давления.

По результатам анализа результатов сейсмоакустического мониторинга 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. Выявлены и обобщены особенности формирования природно-техногенного поля напряжений, во многом обусловленные тектонической структурой массива горных пород и сложной геометрией выработанного пространства.

Большое число зарегистрированных в процессе мониторинга акустически активных зон и крупных проявлений удароопасности и техногенной сейсмичности были сопоставлены с геолого-структурными особенностями месторождения. На основе полученного в результате исследований материала, уточняющего морфологию рудной и метасоматической системы месторождения на различных глубинных уровнях, были построены карты изогипс и 3D-модель контуров основных горных пород. 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.

Таким образом, было установлено, что 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 (рис. 1).

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 (рис. 1).

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

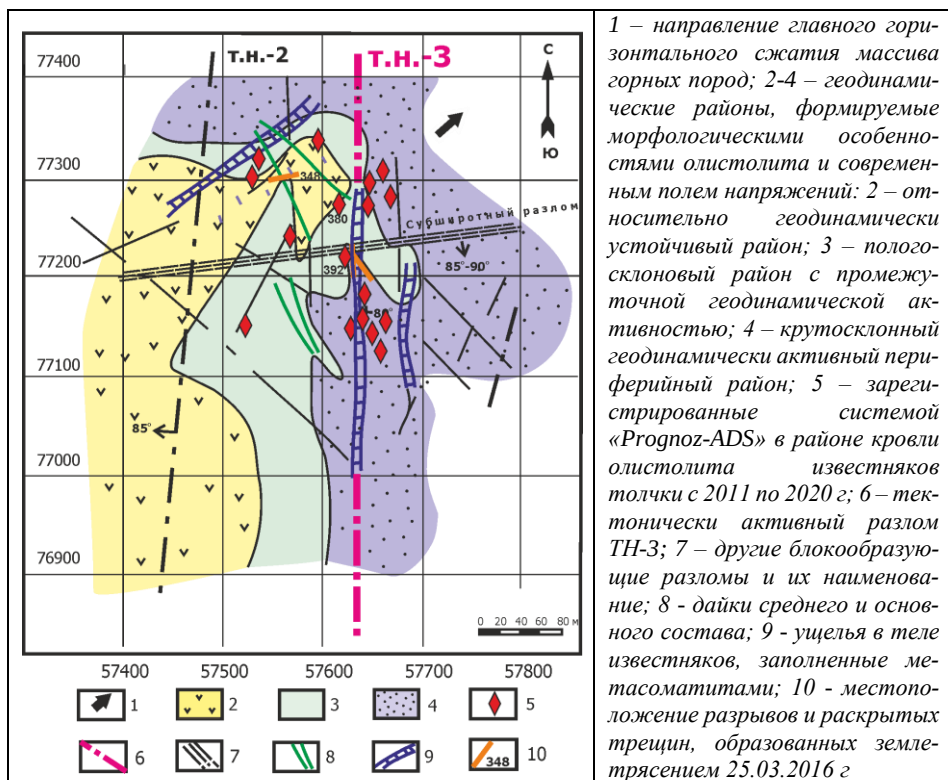


Рис. 1. Блоковая структура тела олистолита рудовмещающих известняков Николаевского месторождения и его геодинамическое районирование

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 наблюдается совпадение 3-х факторов; в 22 % наблюдается приуроченность их к тектоническим структурам и кровле олистолита известняков; 13 % - зарегистрированы при пересечении контуров очистного блока и элементов тектонической структуры. Таким образом, в 91 % случаев формирование удароопасных ситуаций происходит на пересечении контуров очистных блоков с тектонически активным разломом ТН-3 или с кровлей олистолита известняков.

Таким образом, в процессе проведения десятилетних сейсмоакустических наблюдений на Николаевском месторождении установлена особенность отрабатки 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 требовала дополнительного изучения методом математического моделирования для обоснования комплекса противоударных и разгрузочных мероприятий, которые позволят эффективно и оперативно управлять горным давлением на глубоких горизонтах месторождения.

В третьей главе приведены результаты моделирования НДС конструктивных элементов системы разработки и оценки влияния структурно-геологических особенностей месторождения на закономерности распределения полей напряжений на глубоких горизонтах Николаевского месторождения.

Результаты исследований физико-механических характеристик показали, что практически все вмещающие породы и руды обладают высокой прочностью, способны к накоплению потенциальной энергии упругого сжатия и хрупкому разрушению в динамической форме. У всех вмещающих пород и руд расчетной модели соотношение упругой и общей деформации превышало 0,7 ($K_{уд} = \epsilon_{упр}/\epsilon_{общ} > 0,7$), что позволяет отнести их к удароопасным породам.

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.

Тензор природных напряжений, действующих до начала разработки и остающихся неизменными на больших расстояниях от горных выработок, определяли на границах расчетных областей выражением:

$$\sigma_h = \begin{bmatrix} \sigma_y & \tau_{yx} & \tau_{yz} \\ \tau_{yx} & \sigma_x & \tau_{xz} \\ \tau_{yz} & \tau_{xz} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,5\gamma H & 0 & 0 \\ 0 & 1,5\gamma H & 0 \\ 0 & 0 & \gamma H \end{bmatrix} \quad (1)$$

При этом $\sigma_h = \gamma \cdot h$, где γ – вес горных пород в рассматриваемой области, т/м³; h – глубина от поверхности, м.

Расчеты напряженно-деформированного состояния для исследуемой области месторождения в интервале глубин 600 (гор. -220 м) ... 840 м (гор. -460м) массива горных пород проводили при следующих граничных условиях:

$$\sigma_{600} = \begin{bmatrix} 39,7 & 0 & 0 \\ 0 & 23,8 & 0 \\ 0 & 0 & 15,9 \end{bmatrix}; \quad \sigma_{840} = \begin{bmatrix} 55,6 & 0 & 0 \\ 0 & 33,3 & 0 \\ 0 & 0 & 22,2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

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. 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).

Качественные изменения полей напряжений возникают вследствие добавления 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.

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 (рис. 2).

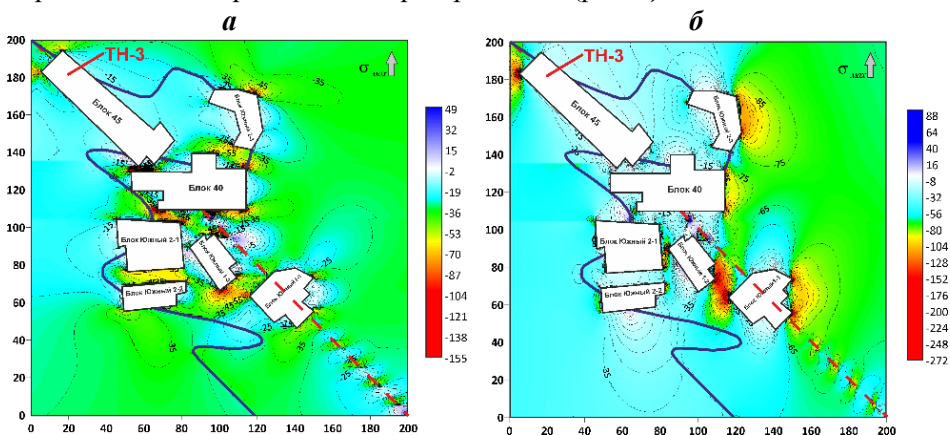
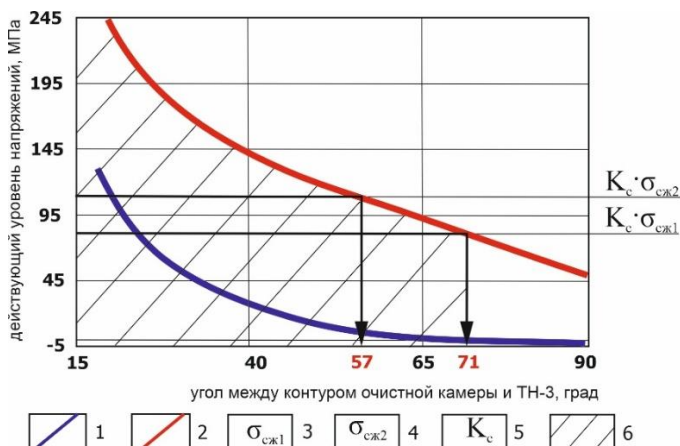


Рис. 2. Распределение горизонтальных напряжений σ_x (а) и σ_y (б) в проекции на гор. -390 м после полной отработки очистных блоков р. з. «Восток-1»

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 (рис. 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

Рис. 3. График изменения действующих максимальных напряжений в целике в зависимости от величины угла, формируемого между очистной камерой и разломом ТН-3

При расположении очистной камеры под углом менее $57\text{--}71^\circ$ (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 предел прочности на сжатие

Таким образом, 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 $57\text{--}71^\circ$ (рис. 3).

Выявленные закономерности распределения полей напряжений в разрабатываемом сложноструктурном массиве горных пород имеют практическое значение и служат 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.

Четвертая глава посвящена разработке и обоснованию комплекса геомеханических мер безопасности для дальнейшей отработки глубоких горизонтов сложноструктурного Николаевского месторождения.

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% (рис. 4).

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; также предлагается в первую очередь осуществлять отработку удароопасных блоков, расположенных на пересечении с разломом ТН-3 и только после этого рекомендуется осуществлять отработку смежных камер, расположенных за пределами разлома ТН-3.

В качестве крайней меры безопасности предлагается рассматривать реализацию с необходимым ТЭО обоснованием технического решения по выборочной закладке твердеющими смесями выработанных пространств, расположенных на пересечении с разломом ТН-3.

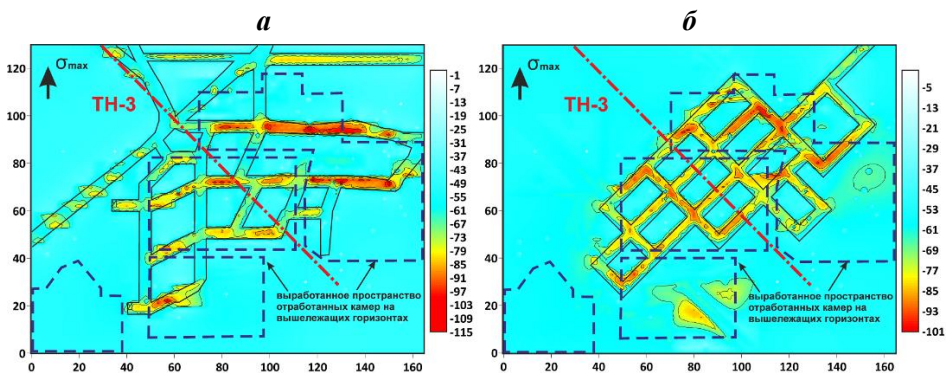


Рис. 4. Распределение горизонтальных напряжений σ_x в кровле горных выработок, расположенных на гор. –323м, при фактическом (а) и предлагаемом (б) варианте расположения штреков и ортов под углом 45° к главным напряжениям

Наряду с региональными противоударными мероприятиями предложено использование локальных – для разгрузки отдельных высоконапряженных участков выработок, целиков и других конструктивных элементов системы

разработки, выявленных акустически активных зон по результатам сейсмоакустического мониторинга или моделирования НДС массива горных пород.

Для снижения концентраций в кровле надштрековых целиков на нижележащем горизонте до начала отработки очистного блока обоснованы параметры бурения вертикальных разгрузочных скважин. По результатам аппроксимации результатов математического моделирования получены количественные зависимости, связывающие параметры бурения разгрузочных скважин, глубину заложения выработок и их ориентацию относительно главных напряжений (рис. 5).

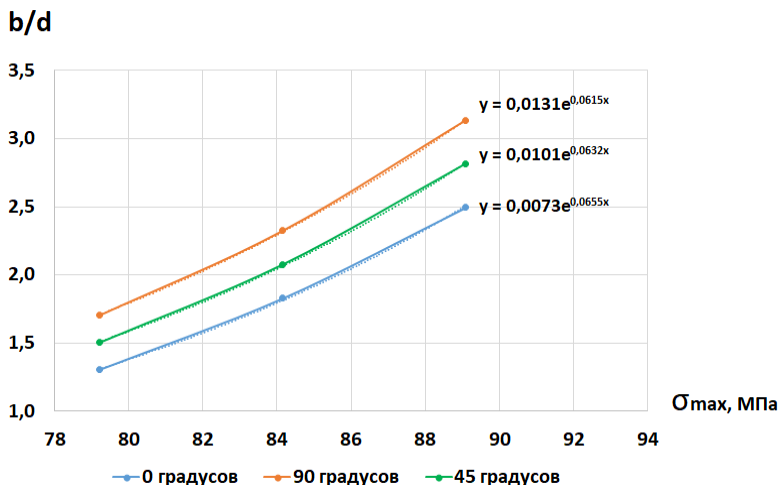


Рис. 5. Рекомендуемые значения отношения b/d при бурении разгрузочных скважин с расположением выработки по отношению к направлению максимальных сжимающих напряжений под углом 0, 45 и 90 градусов.

Для предложенного варианта трассировки подготовительных выработок под отработку очистного блока (расположенных под углом 45° к направлению максимальных сжимающих напряжений) отношение ширины межскважинного целика b к диаметру бурения разгрузочных скважин d рассчитывается по формуле:

$$b/d = 0,0101 * e^{(2,484311104 - 0,006537661 * Z)} \quad (3)$$

Для широко используемого на Николаевском месторождении диаметра разгрузочных скважин $d = 0,105$ м расстояние между разгрузочными скважинами b определяется по формуле:

$$b = 0,0011 * e^{(2,484311104 - 0,006537661 * Z)} \quad (4)$$

где z – горизонт расположения выработки, м.

Таким образом, снижение опасных концентраций в межэтажных целиках оказывается возможным обеспечивать также 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.

Допустимый уровень безопасности горных работ на глубоких горизонтах Николаевского месторождения может быть обеспечен также с использованием оперативного выявления зон опасных концентраций напряжений на участках активных разломов и высоконапряженного сложноструктурного массива горных пород (в пределах выявленных акустически активных зон) с использованием метода сотрясательного взрывания (рис. 5) за счёт направленного управления геомеханическими процессами.

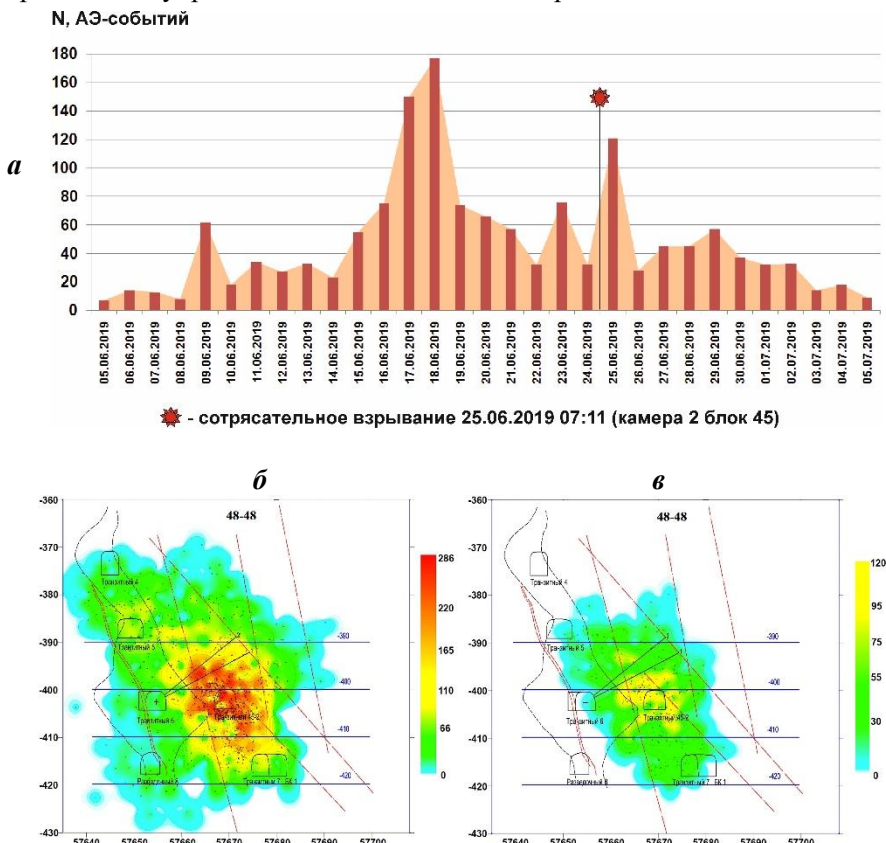


Рис. 5. График (а) и карты изменения акустической активности в проекции на разрез 48 до (а) и после (б) проведения эксперимента сотрясательного взрывания 25.06.2019, 07:11 на Николаевском месторождении

Разработанная для условий Николаевского месторождения типизация очистных блоков предлагается для заблаговременной оценки потенциальной удароопасности выемочных единиц и обоснованного выбора комплекса геомеханических мер безопасности (табл. 1).

Табл. 1 – Разработанная для Николаевского рудника типизация очистных блоков по степени удароопасности и 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 (пересечение с разломом ТН-3 под углом более 57°)	Высокая степень удароопасности (пересечение с разломом ТН-3 под углом менее 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).

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).

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 моделированием 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 со тряса тельным взрыванием и скважинной разгрузкой) выбирается по разработанному 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 моделирования напряжённо-деформированного состояния массива и сейсмоакустического мониторинга, осуществляемого по разработанной методике в режиме реального времени в процессе ведения горных работ.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, рецензируемых базами Web of Science и Scopus:

1. Сидляр А.В. Геомеханическое обоснование мер безопасности при разработке Николаевского полиметаллического месторождения, опасного по горным ударам [Текст] / А.В. Сидляр, М.И. Потапчук, А.А. Терешкин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2017. № 7. - С. 184-194.

2. Рассказов И.Ю. Особенности регистрации и обработки данных геоакустического контроля массива горных пород на действующем руднике [Текст] / Рассказов И.Ю. [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2011. № 8. - С. 212-218.

3. Рассказов И.Ю. Прогнозная оценка удароопасности массива горных пород при отработке глубоких горизонтов Николаевского месторождения

[Текст] / Рассказов И.Ю. [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2012. №4. - С. 96-102.

4. Потапчук М.И. Повышение безопасности разработки удароопасных жильных месторождений Восточного Приморья [Текст] / М.И. Потапчук, Г.А. Курсакин, А.В. Сидляр // Горный журнал. - 2013. №10. - С. 30-34.

5. Рассказов И.Ю. Особенности формирования техногенного поля напряжений при отработке глубоких горизонтов Николаевского месторождения [Текст] / Рассказов И.Ю. [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2013. №12. спец. вып. 4: Проблемы освоения георесурсов Дальнего Востока. - С. 97-106.

6. Рассказов И.Ю. Совершенствование технических средств локального контроля удароопасности при ведении горных работ в сложных горно-геологических условиях [Текст] / Рассказов И.Ю. [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2014. № 12. спец. вып. 5: Проблемы освоения георесурсов Дальнего Востока. - С. 22-30.

7. Potapchuk M.I. Improvement of safety of development of bump hazardous vein deposits of Eastern Primorye / Potapchuk M.I., Kursakin G.A., Sidlyar A.V. // Eurasian Mining. - 2014. №1. - С. 18-22.

8. Потапчук М.И. Повышение безопасности подземной отработки месторождений сложной тектонической структуры [Текст] / Потапчук М.И. [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2016. спец. вып. № 21: Проблемы комплексного освоения георесурсов. - С. 120-131.

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

10. Sidorov D.V., Potapchuk M.I., Sidlyar A.V., Kursakin G.A. Assessment of rock-burst hazard in deep layer mining at Nikolayevskoye field // Journal of Mining Institute. - 2019. Т. 238. - С. 392-398.

11. Рассказов И.Ю. Анализ проявлений техногенной сейсмичности в удароопасном массиве пород Николаевского месторождения [Текст] / Рассказов И.Ю. [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2020. № 11. - С. 46-56.

Статьи в прочих изданиях:

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

13. Сидляр А.В. Совершенствование программных средств моделирования напряженно-деформируемого состояния массива горных пород [Текст] / Сидляр А.В. [и др.] // Идеи, гипотезы, поиск...: сб. статей по материалам науч.

конф. аспирантов, соискателей и молодых исследователей. Магадан: СВГУ. - 2012. Вып. 19. - С. 111-116.

14. Sidlyar A.V., Saksin B.G., Anikin P.A., Lomov M.A. 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.

15. Сидляр А.В. Обоснование параметров скважинной разгрузки массива горных пород Николаевского полиметаллического месторождения, опасного по горным ударам [Текст] / А.В. Сидляр, М.И. Потапчук // В сборнике: Проблемы комплексного освоения георесурсов. Материалы VI Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых. - 2017. - С. 81-88.

16. Потапчук М.И. Прогнозная оценка геодинамической опасности при отработке глубоких горизонтов Николаевского месторождения [Текст] / Потапчук М.И. [и др.] // В сборнике: Проблемы комплексного освоения георесурсов. Материалы IV Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых. - 2011. - С. 110-118.

17. Рассказов И.Ю. Геомеханическая оценка технологии отработки участка рудной залежи "Восток-1" Николаевского месторождения [Текст] / 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.

18. Rasskazov I.Yu., Saksin B.G., Anikin P.A., Potapchuk M.I., Gladyr A.V., Sidlyar A.V., Damaskinskaya E.E., Prosekin B.A., Osadchiy S.P. Methods and results of burst-hazard assessment in the underground mines of Russian Far East [Текст] // В сборнике: Rockbursts and seismicity in mines. Proceeding of the 8th International Symposium. - 2013. - С. 319-322.

19. Рассказов И.Ю. Оценка и контроль геомеханического состояния массива горных пород при подземной разработке рудных месторождений Дальневосточного региона России [Текст] / Рассказов И.Ю. [и др.] // В сборнике: VI International Geomechanics Conference. - 2014. - С. 46-51.

20. Потапчук, М.И. Геомеханические условия разработки рудной залежи "Восток-1" Николаевского месторождения [Текст] / Потапчук М.И. [и др.] // 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.

21. Rasskazov I.Yu., Saksin B.G., Anikin P.A., Gladyr A.V., Potapchuk M.I., Usikov V.I., Tereshkin A.A., Sidlyar A.V. Methods and technical facilities for the assessment of geodynamic risk and geomechanical monitoring of burst-hazard rock massif [Текст] // В сборнике: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. Set of 2 volumes. - 2018. - С. 1501-1506.

22. Rasskazov I.Yu., Saksin B.G., Usikov V.I., Sidlyar A.V. The assessment of the impact of natural and anthropogenic factors on the current

stress-strain state of rock mass of burst-hazardous ore deposits in the East of Russia // В сборнике: E3S Web of Conferences. - 2018. С. 02011.

23. Lugovoi V.A., Rasskazov I.Yu., Tsoi D.I., Rasskazov M.I., Sidlyar A.V. The research of remote earthquakes impact on the intensity of geomechanical processes in burst-hazardous rock mass. // В сборнике: Problems of Complex Development of Georesources. electronic resource. Сер. "E3S Web of Conferences" 2018. С. 02018.

24. Рассказов М.И. Моделирование геомеханических процессов при отработке сложно-структурных удароопасных месторождений Дальневосточного региона [Текст] / Рассказов И.Ю. [и др.] // В книге: Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горно-технических и природных системах. Новосибирск. - 2019. - С. 161-180.

25. Гладырь А.В. Алгоритмическое обеспечение выделения опасных участков горного массива [Текст] / А.В. Гладырь, А.В. Сидляр // Проблемы недропользования. - 2019. № 2 (21). - С. 35-42.

26. Sidlyar A.V., Saksin B.G., Potapchuk M.I., Usikov V.I., Lomov M.A. 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.

27. Rasskazov I.Yu., Lugovoy V.A., Tsoy D.I., Sidlyar A.V. The analysis of conditions of geodynamic process activation and manifestation of technogenic seismicity on underground mines of the Far East region [Текст] // The 5th International Conference, Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences. Moscow, 2019. P. 379-386.

28. Rasskazov I.Yu., Sidlyar A.V., Tereshkin A.A., Golosov A.M. Assessment and control of geodynamical risks under the conditions of a rock-bump hazardous complex deposit // В сборнике: E3S WEB OF CONFERENCES. VIII International Scientific Conference "Problems of Complex Development of Georesources" (PCDG 2020). - 2020. С. 01011.

29. Ломов М.А. Оценка факторов удароопасности Николаевского месторождения с помощью системы 3D-моделирования результатов сейсмоакустического мониторинга [Текст] / М.А. Ломов, А.В. Сидляр // Проблемы недропользования. - 2021. - № 1 (28). - С. 64-72.

Свидетельства на разработанные алгоритмы и программное обеспечение:

30. Сидляр А.В. GeoAcousticAnalytics / Сидляр А.В. [и др.] // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, рег. №2020613397 от 16.03.2020. 2020.

31. Сидляр А.В. AcousticEventGroups / Сидляр А.В. [и др.] // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, рег. №2018665942 от 11.12.2018. 2018.

32. Сидляр А.В. AcousticGroupsVisualization / Константинов А.В. [и др.] /
Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, рег. №2018665941 от
11.12.2018. 2018.

Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Гарнитура «Times New Roman». Печать оперативная.
Усл. печ. л. 0,8. Уч. изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. заказ № ПЧ0000000460.

Отпечатано в ООО «ПеЧатня»
г. Хабаровск, ул. Тургенева, 56