

На правах рукописи

Тхориков Андрей Игоревич



**ПРОГНОЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ МАССИВА ПРИ РАЗРАБОТКЕ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ БОГАТЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД**

Специальность 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021 год

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Трушко Владимир Леонидович

Официальные оппоненты:

Айнбиндер Игорь Израилевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, отдел №3. Освоения месторождений твердых полезных ископаемых на больших глубинах, заведующий отделом;

Румянцев Александр Евгеньевич

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Институт Гипроникель», Горная лаборатория, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула.

Защита диссертации состоится 29 сентября 2021 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.06 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 29 июля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ИВАНОВ
Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Ежегодный объем добычи и производства товаров железных руд в мире составляет несколько миллиардов тонн в год и около 50 % поступает на мировой рынок. Ежегодный оборот железорудного сырья (ЖРС) составляет десятки миллиардов долларов США. Современные прогнозы предсказывают рост торговли железорудным сырьем в 1.5 раза. На данный момент Австралия и Бразилия контролируют 65% мирового рынка торговли ЖРС, однако у России существует возможность укрепить позиции на восточноевропейском рынке. В настоящий момент Россия добывает около 100 млн. т руды в год и планирует наращивать объемы. Для резкого наращивания объемов добычи необходимо обратить внимания на регионы, обладающие обширными запасами богатых железных руд, например на регион Курской магнитной аномалии. В данном регионе среди прочих выделяется Яковлевское месторождение с содержанием железа в руде до 69%. На данный момент извлекаемые запасы месторождения составляют 40 млрд. т. Разработка месторождения ведется подземным способом. Данное месторождение является уникальным по качеству добываемого сырья и по сложности гидрогеологических условий. Особую сложность составляет глубина разработки месторождения, которая доходит до 500-600 м. Поэтому для успешного освоения месторождения и обоснования безопасности ведения горных работ необходимо иметь прогноз изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива с учетом развития горных работ и увеличением глубины разработки.

Исследованием напряженно-деформированного состояния массива железорудных месторождений занимались российские ученые Протосеня А.Г., Трушко В.Л., Дашко Р. Э, Протодьяконов М. М., Протодьяконов М. М. младший,

Котенков А. В., Карасев М. А., Румянцев А.Е., Харисов Т. Ф., Айнбиндер И. И., Овчаренко О. В., Пацкевич П. Г., Еременко В. А., Зотеев О. В. и зарубежные ученые Бартон Н., Хок Е., Браун, Мор, Бандис С., Лэнгфорд Дж., Мах Кр., Вайли Д. и др. Однако не решена задача прогноза НДС массива во времени при развитии горных работ с учетом наличия высоконапорных водоносных горизонтов в налегающей толще горных пород.

Цель работы. Обеспечение устойчивости горных выработок и безопасности ведения горных работ при разработке месторождений богатых железных руд под высоконапорными водоносными горизонтами на основе прогноза НДС рудного массива.

Идея работы. Прогноз изменения напряженно-деформированного состояния рудного массива реализуется на основе обоснованного натурными данными критерия прочности с учетом развития горных работ во времени при наличии высоконапорных водоносных горизонтов.

Основные задачи работы:

1. Выполнить анализ условий разработки месторождений богатых железных руд и методов прогноза НДС массива горных пород.

2. Выполнить оценку форм потери устойчивости горных выработок при ведении горных работ на месторождениях богатых железных руд.

3. Выявить закономерности изменения НДС рудного, породного и закладочного массивов по результатам натурных исследований.

4. Обосновать геомеханическую модель и критерий прочности рудного массива.

5. Выполнить математическое моделирование и выявить закономерности изменения НДС массива с учетом развития горных работ во времени.

6. Разработать методику прогноза НДС массива во времени при наличии высоконапорных водоносных горизонтов.

7. Разработать рекомендации по прогнозу изменения НДС массива и повышению устойчивости горных выработок при развитии горных работ.

Научная новизна работы:

1. Разработана пространственная геомеханическая модель напряженно-деформированного состояния массива богатых железных руд для условий месторождений Курской магнитной аномалии.

2. Выявлены закономерности изменения НДС рудного массива во времени с учетом развития горных работ и влияния высоконапорных водоносных горизонтов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработаны рекомендации по изменению геометрических параметров выработок, повышающих их устойчивость, на основе прогноза изменения НДС массива при развитии горных работ во времени;

2. Разработана пространственная геомеханическая модель массива с применением сертифицированного программного комплекса Abaqus CAE для численного моделирования НДС массива богатых железных руд, показавшая хорошую сходимость результатов моделирования с данными, полученными в результате натуральных исследований.

Методология и методы исследования. Работа выполнена с использованием комплексного метода исследований, включающего анализ опубликованных источников и результатов натуральных исследований, численное моделирование геомеханических процессов и экспериментальную проверку разработанных рекомендаций.

В качестве основных инструментов исследования применен натуральный эксперимент и программно-аппаратный

комплекс Simulia Abacus CAE, который позволяет решать сложные инженерные задачи.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Напряженно-деформированное состояние рудного массива вокруг выработок следует описывать упруго-пластической моделью, учитывающей нелинейный характер деформирования рудного массива.

2. Расчет НДС рудного массива с наличием высоконапорных водонапорных горизонтов следует вести с использованием критерия прочности Хоека-Брауна.

3. Повышение устойчивости горных выработок достигается изменением геометрических параметров горных выработок на основе прогноза НДС массива при развитии горных работ.

Степень достоверности результатов исследования, научных положений и рекомендаций обеспечивается представительным объемом данных натуральных наблюдений, использованием современных методов численного моделирования геомеханических процессов и удовлетворительной сходимостью результатов натуральных и численных исследований.

Апробация результатов. Результаты исследований и основные научные положения докладывались:

– На международной научно-практической конференции «Современные проблемы геомеханики при освоении месторождений полезных ископаемых и подземного пространства мегаполисов» в Горном университете (ноябрь 2017 г.);

– На международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (25-26 октября 2018 г.)

– На всероссийской научной конференции «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса» (март 2020 г.)

Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследования; построении геомеханической модели и выполнении расчетов НДС рудного массива с учетом фактора времени; формулировке научных положений и анализе полученных результатов исследований; разработке практических рекомендаций по повышению устойчивости выработок при ведении горных работ.

Публикации по работе. Основные результаты исследования в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 1 статье в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования (Scopus). Подана 1 заявка на получение патента.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 103 наименования. Диссертационная работа изложена на 110 страницах машинописного текста, содержит 57 рисунков и 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая новизна и практическая значимость исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ горно-геологических и горнотехнических условий Яковлевского месторождений богатых железных руд. Приведена оценка мирового опыта прогноза напряженно-деформированного состояния рудного массива при ведении горных работ и методов повышения устойчивости горных выработок.

Во второй главе приведены методики и результаты натурных исследований напряженно-деформированного состояния рудного, породного и закладочного массивов при ведении горных работ. Проведена оценка устойчивости горных выработок, определены деформации и сдвигения вышележащей рудной толщи.

В третьей главе проведен сравнительный анализ различных геомеханических моделей горного массива и обосновано применение упруго-пластической модели и критерия прочности Хоека-Брауна. Произведено численное моделирование изменения НДС рудного массива с учетом фактора времени.

В четвертой главе разработаны рекомендации по прогнозу изменения НДС массива и повышению устойчивости горных выработок.

В заключении приведены основные результаты и выводы, полученные при выполнении исследований.

Основные результаты исследований отражены при доказательстве следующих научных положений:

1. Напряженно-деформированное состояние рудного массива вокруг выработок следует описывать упруго-пластической моделью, учитывающей нелинейный характер деформирования рудного массива.

Для решения задачи на основе анализа натурных данных и результатов испытаний физико-механических свойств образцов руд и вмещающих пород обоснованно применение упруго-пластической модели наиболее точно описывающей

нелинейный характер деформирования массива, и показывающей хорошую сходимость с результатами натуральных исследований.

Для построения пространственной геомеханической модели методом конечных элементов выбран участок рудного массива размерами 1000x300 м с системой из 7 параллельных выработок полигональной формы с размерами: высота – 12,0 м, ширина – 9,8 м (Рисунок 1 и 2), которые проходятся и закладываются в шахматном порядке.

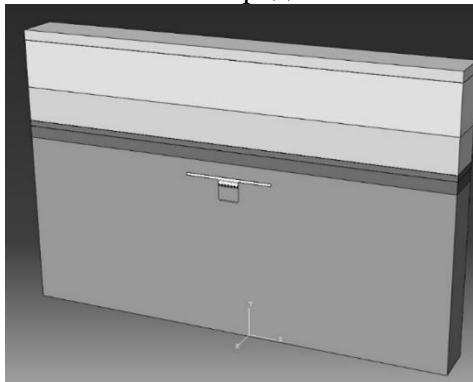


Рисунок 1 – пространственная геомеханическая модель массива горных пород

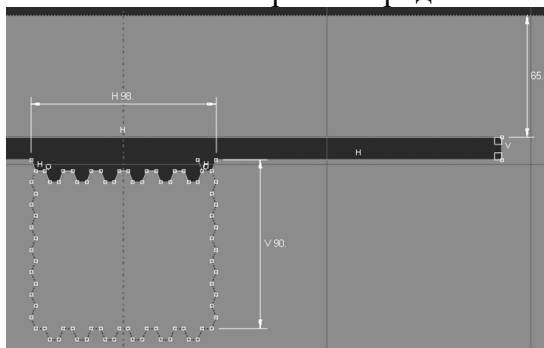


Рисунок 2 – Принципиальная схема конечно-элементной модели

Для реконструкции естественного напряженно-деформированного состояния массива грани модели закрепляются от смещений, производится жесткая заделка дна модели и вводится фактор гравитации. Также в модели учитывались свойства вышележащих высоконапорных водоносных горизонтов.

Кровля искусственной потолочины мощностью 12.5 м расположена от верхней грани рудного массива на глубине 65 м, что соответствует мощности рудной толщи над верхним слоем (предохранительный рудный целик), переход на систему разработки полигональными выработками осуществляется с третьего очистного слоя.

Рудный массив, вмещающий горные выработки представлен наиболее слабыми богатыми железными рудами, разрабатываемыми на руднике. Физико-механические свойства богатых железных руд и вышележащих породных слоев представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 - Физико-механические свойства вмещающих пород

Наименование породы	Характеристики				
	Модуль деформации E, МПа	Коэффициент Пуассона ν	Объемная масса γ , КН/м ³	Угол внутреннего трения φ , град.	Удельное сцепление C, кПа
Третичные отложения	15200	0,27	19,2	-	-
Мел	63000	0,24	18,6	20	100
Песок	4800	0,32	20,2	27	15060
Глина	4600	0,34	21,3	18	120
Известняк	36400	0,26	24,5	28	780

Таблица 2 - Физико-механические характеристики богатых железных руд в сухом и водонасыщенном состоянии

Наименование породы	Характеристики			
	Угол внутреннего трения φ , град.	Удельное сцепление C , МПа	Временное сопротивление сжатию, МПа	Модуль упругости $\cdot 10^4$ МПа
Руда маритовая, рыхлая, в естественном состоянии	23	$\frac{0,41-0,72}{0,5}$	$\frac{1,23-2,16}{1,5}$	$\frac{1,52-4,5}{3,1}$
Руда маритовая, рыхлая, в водонасыщенном состоянии	0-9	$\frac{0-0,53}{0,22}$	$\frac{0-1,26}{0,61}$	$\frac{0,85-2,35}{1,01}$

На границах модели приняты следующие нагрузки: вертикальные $\sigma_y = 7$ МПа и горизонтальные $\sigma_x = 4$ МПа, которые получены на основании экспериментальных исследований.

Для каждого очистного слоя принято начальное состояние НДС и учтено его изменение с учетом ведения горных работ. Решены задачи определения главных, горизонтальных и вертикальных напряжений на контурах крайних очистных выработок полигональной формы при отработке слоев с 1 по 16 на глубине от 590 м до 670 м.

Выявлены закономерности изменения главных напряжений на контуре очистных выработок в зависимости от глубины обрабатываемого слоя (Рисунок 3).



Рисунок 3 – Зависимость изменения главных напряжений на границе очистных работ

При обработке первых 4 слоев происходит резкий скачок главных напряжений, а затем наблюдается плавный рост главных напряжений до достижения предельных значений, при обработке 13-14 слоя.

2. Расчет НДС рудного массива с наличием высоконапорных водонапорных горизонтов следует вести с использованием критерия прочности Хюека-Брауна.

Напряженно-деформированное состояние горного массива определяется его строением, физико-механическими свойствами пород, естественным полем напряжений и техногенными факторами.

Исследованиями физико-механических свойств рудного массива Яковлевского месторождения установлено, что наибольшее распространение имеют рыхлые руды с низкой

прочностью (менее 1,0 МПа на одноосное сжатие), доля которых составляет более 60% разведанных запасов.

Для прогноза ведения горных работ на больших глубинах (более 600 м), необходимо выявить формы потери устойчивости горных выработок и обосновать критерий потери прочности горных пород.

Для оценки предельного состояния массива выполнен анализ экспериментальных данных, полученных в шахтных условиях и критериев прочности, характеризующих возможные варианты разрушения рудного массива:

Критерий прочности Кулона-Мора

Данный критерий представлен в виде (Формула 1):

$$\tau = (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi + c \quad (1)$$

где τ - прочность на сдвиг; u – поровое давление; σ – эффективные нормальные напряжения; φ – эффективный угол внутреннего трения; c – сцепление

Критерий Кулона-Мора наиболее часто используется в геотехнических расчетах для оценки потери устойчивости пород вокруг выработок в скальном и полускальном массиве. Однако критерий не отражает нелинейный характер деформирования массива горных пород, поэтому используется с очень серьезными допущениями.

Критерий прочности М.М. Протодяконова младшего

Критерий М. М. Протодяконова младшего представлен в виде следующей зависимости (Формула 2):

$$\tau_{nt} = \tau_{max} \left[\frac{(\sigma_p + \sigma_n)^2}{(\sigma_p + \sigma_n)^2 + a^2} \right]^{3/8} \quad (2)$$

где σ_n – нормальное напряжение, τ_{nt} – касательное напряжение, τ_{max} и a – характеристики материала, первый дает ординату асимптоты, к которой стремится предельная огибающая, а второй в начале координат задает форму

(крутизну) огибающей, σ_p — показатель прочности породы при одноосном растяжении.

Критерий учитывает обратное напряженное состояние массива соответствующее обобщенному растяжению ($\sigma_3 = \sigma_2 < \sigma_1$), когда коэффициент Лодэ $\mu \sigma = -1$.

Данное оригинальное решение непригодно для большинства горных пород и не может быть применено для условий Яковлевского месторождения.

Критерий Бартона-Бандиса

Критерий сопротивления сдвигу по Бартону- Бандису для массива пород имеет следующую зависимость (Формула 3):

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \left[\varphi_b JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (3)$$

где τ – касательное напряжение;

JRC – коэффициент шероховатости поверхности скольжения;

σ_n – нормальная сила, действующая на поверхность стыка породы;

JCS - сопротивление поверхности стыка сжатию;

φ_b – базовый угол внутреннего трения поверхности скольжения.

Критерий прочности Бартона-Бандиса широко используется для моделирования сдвиговой прочности породы по трещинам. Этот критерий является нелинейным.

По возможности параметры прочности для данного критерия должны определяться в ходе экспериментальных измерений, в связи с чем его использование для прогнозирования характера разрушения породного массива весьма затруднительно.

Критерий прочности Хоека-Брауна

Критерий является примером нелинейного характера разрушения скальных пород и подтвержден результатами

многолетних экспериментальных исследований. Данный критерий развивается поэтапно, опираясь на результаты обобщений эмпирических данных, собранных в различных условиях в течении нескольких десятилетий на основании анализа разрушения окружающего массива сотен подземных выработок и скальных откосов.

Условие Хоека-Брауна описывает разрушение массива породы следующим образом (Формула 4):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + S \right)^a \quad (4)$$

где σ_1 – большее главное напряжение во время обрушения породы;

σ_3 – меньшее главное напряжение во время обрушения породы;

σ_{ci} – прочность при одноосном сжатии неразрушенных массивов породы;

m_b, S – нелинейные параметры, зависящие от свойств породы;

a – параметр трещиноватости породы.

Параметры входящие в формулу определяются на основании графиков, составленных Хоеком и Брауном для различных горных пород и условий ведения горных работ.

Критерий прочности Хоека-Брауна позволяет наиболее полно учесть нелинейный характер разрушения рудного массива Яковлевского месторождения, и показывает высокую сходимость с результатами натурных исследований потери устойчивости и разрушения пород вокруг горных выработок.

3. Повышение устойчивости горных выработок достигается изменением геометрических параметров горных выработок на основе прогноза НДС массива при развитии горных работ.

По результатам моделирования определены зависимости, описывающие изменения полей вертикальных и горизонтальных напряжений вокруг выработок полигональной формы, на границе ведения очистных работ, с увеличением глубины разработки с учетом влияния высоконапорных водоносных горизонтов.

В соответствии с методикой прогноза НДС массива горных пород, определена область устойчивого состояния горных выработок полигональной формы при отработке месторождений богатых железных руд.

Результаты натурных наблюдений и численного моделирования НДС рудного массива показывают, что вокруг незакрепленной выработки, пройденной в рыхлых рудах, наблюдается потеря устойчивости при ведении горных работ на глубине более 640 м или при отработке 12 слоя.

При обводнении руд происходит резкое снижение прочностных свойств и возрастает вероятность потери устойчивости при ведении горных работ. Происходит снижение временного сопротивления одноосному сжатию слабых БЖР в среднем с 0,68 МПа до 0,38 МПа, при этом возможно падение практически до 0. Модуль общей деформации уменьшается в среднем с 137,8 МПа до 35 МПа.

Прогноз НДС массива по разработанной методике позволяет обосновать геометрические параметры очистных выработок при добыче неустойчивых богатых железных руд с наличием напорных водоносных горизонтов в покрывающей толще горных пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной задачи геомеханического прогноза изменения напряженно-деформированного состояния рудного массива

при развитии горных работ с учетом влияния высоконапорных водоносных горизонтов.

Основные научные и практические результаты выполненных исследований:

1. Установлено при экспериментальном изучении физико-механических свойств горных пород более чем двукратное снижение прочностных и деформационных свойств богатых железных руд при обводнении с возможностью перехода в их плавунное состояние.

2. Анализ результатов натурных исследований изменений напряженно-деформированного состояния массива выявил рост трещиноватости и развитие сдвиговых деформаций рудного массива вокруг выработок на глубину 0,54-0,67 м.

3. Разработана пространственная геомеханическая модель рудного массива, учитывающая нелинейное упруго-пластическое деформирование рудного массива и изменения прочностно-деформационных свойств вмещающих пород при наличии высоконапорных водоносных горизонтов.

4. Выявлены закономерности изменения НДС массива с увеличением глубины разработки месторождения очистными выработками полигональной формы. Установлено, что с увеличением глубины разработки напряжения растут не линейно. Основной рост главных напряжений наблюдается при отработке первых четырех слоев, причем напряжения увеличиваются на 3% для каждого последующего слоя. В дальнейшем увеличение напряжений происходит на 1% для каждого слоя, и потеря устойчивости очистных выработок наблюдается на уровне 12 слоя.

5. Предложен и обоснован критерий прочности Хоека-Брауна, учитывающий снижение прочностных характеристик горных пород под воздействием природного поля напряжений и горных работ и показывающий хорошую

сходимость с экспериментальными данными для рудного массива.

6. Разработана методика прогноза напряженно-деформированного состояния рудного массива с наличием высоконапорных водоносных горизонтов, учитывающая развитие горных работ во времени.

7. Разработаны рекомендации по повышению устойчивости очистных горных выработок в рудном массиве с увеличением глубины разработки при наличии высоконапорных водоносных горизонтов путем изменения геометрических параметров очистных горных выработок, позволяющих снизить в 1.5 раза величину напряжений на контуре выработок.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при проектировании и строительстве горнодобывающих железорудных предприятий, а также в учебном процессе при подготовке и переподготовке специалистов по направлению горное дело.

Дальнейшие исследования планируется развивать в направлении повышения точности прогноза напряженно-деформированного состояния рудного массива и совершенствования построения геомеханической модели, как многофазной систем, объединяющей геомеханические и гидродинамические расчеты.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Тхориков А. И.** Компьютерное моделирование геомеханических процессов для прогноза напряженно-деформированного состояния при разработке мощных железорудных месторождений / А.И. Тхориков - DOI: 10.25018/0236-1493-2019-4-7-307-315. - Текст:

непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2019. №S7. – С. 307–315 (Перечень ВАК).

2. **Тхориков, А.И.** Компьютерное моделирование геомеханических процессов для прогноза напряженно-деформированного состояния при проведении выработок через целик равный трем пролетам выработки / А.И. Тхориков, Р.О. Сотников, В.В. Глинский. - DOI: 10.25018/0236-1493- 2020-6-22-3-13. - Текст: непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. - № 6. специальный выпуск 22. – С. 3–13. (Перечень ВАК).

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus):

3. Development of a model for predicting the dynamic effect on the stability of rock excavation / M.A. Karasev, R.O. Sotnikov, V.U. Sinegubov, N.A. Egorova, K.V. Makarov, A.I. Thorikov. - DOI:10.1088/1742-6596/1384/1/012051. - Текст: непосредственный // Journal of Physics: Conference Series. - 2019. - № 1. - pp. 1230-1236. (Scopus).

Публикации в прочих изданиях:

4. Тхориков А.И. Современные методы крепления лба забоя при проведении выработок большого сечения / А.И. Тхориков. - Текст: электронный // А.И. Тхориков - Текст: электронный // В сборнике: Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации. Сборник научных трудов XVII Международной научно-практической конференции. 2018. С. 280-283. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_35037689_89134194.pdf (дата обращения: 09.07.2021).

5. Тхориков А. И. Применение технологий компьютерного моделирования для визуализации результатов геомеханических процессов при обучении студентов/ А.И. Тхориков - Текст: электронный // В сборнике: Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для

минерально-сырьевого комплекса. Сборник научных трудов III Всероссийской научной конференции. – 2020. С. 1532-1538. – URL:

https://elibrary.ru/download/elibrary_42877731_58811929.pdf

(дата обращения: 09.07.2021).

Программа для ЭВМ:

1. Программа для ЭВМ № 2021661446/69 Российская Федерация, программа для расчета параметров критерия прочности Хоека-Брауна: заявлено 22.07.2021 / А.И. Тхориков – С. 4.