

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГОРНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ
И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА – МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
ВНИМИ»

ГРЕЧИШКИН Павел Владимирович

**ПРОГНОЗ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ
ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВЫРАБОТОК НА РУДНЫХ И УГОЛЬНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЯХ**

Специальность 2.8.6 — Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Сокращение удобных и безопасных для разработки запасов полезных ископаемых в сочетании с ужесточившейся конкуренцией на всех уровнях привело к тому, что горнодобывающие предприятия вынуждены проектировать и вести добычу в условиях растущих глубин, высокой газонасыщенности пород и угольных пластов и необходимости повышения скоростей проведения выработок.

В условиях отработки массивов газонасыщенных горных пород и угольных пластов при повышении темпов проведения выработок основной проблемой являются различные газодинамические явления (ГДЯ), в том числе внезапные выбросы пород, угля и газа. Несмотря на рост числа опасных по выбросам запасов, применение предварительной отработки защитных пластов, профилактическое увлажнение опасных пластов, гидроотжим призабойной зоны пласта, гидровывывание опережающих полостей и щелей, технологии взрывного воздействия, региональных и локальных мер предотвращения динамических явлений, в т. ч. с использованием гидравлического и взрывного воздействия, а также организация контроля за правильным осуществлением этих мероприятий позволили добиться снижения общего числа внезапных выбросов.

Однако существующие способы управления состоянием газонасыщенных горных массивов (ГГМ) не охватывают всего разнообразия горно-геологических условий на угольных и рудных месторождениях и во многом сдерживают темпы производственных процессов, доступные для текущего уровня технологий, существенно снижают потенциал достижений в области механизации и автоматизации горных работ.

Поэтому изучение и обобщение опыта ведения работ в выбросоопасных условиях, разработка новых и модернизация известных способов предупреждения и прогнозирования внезапных выбросов под вновь открываемые горно-геологические условия (ГГУ) являются актуальной и востребованной задачей.

Целью работы является разработка эффективных способов управления состоянием газонасыщенного горного массива, обеспечивающих устойчивость выработок и предотвращение газодинамических явлений.

Идея работы заключается в разработке комплекса мероприятий по гидро- и взрывному воздействию на ГГМ с учетом ГГУ, параметров проведения горных выработок и локального напряженно-деформированного состояния массива (НДС), оцениваемого геофизическими методами.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи исследования:**

1. Обосновать параметры и провести шахтные испытания гидровоздействия на выбросоопасный угольный пласт для эффективного предотвращения ГДЯ.

2. Выявить факторы, определяющие возможность проявления ГДЯ по результатам лабораторных исследований и натурных наблюдений свойств пород ГГМ на рудных месторождениях.

3. Определить для ГГМ возможные механизмы возникновения ГДЯ на рудных месторождениях на основе математического моделирования напряженно-деформированного состояния.

4. Обосновать параметры и провести шахтные испытания взрывного воздействия на ГГМ для эффективного предотвращения ГДЯ на рудных месторождениях.

5. Исследовать применение двух способов предотвращения ГДЯ на основе взрывного воздействия на ГГМ, оценить их влияние друг на друга.

6. Разработать метод локального прогноза ГДЯ и провести апробацию в различных горно-геологических условиях.

7. Определить пороговые значения показателей для прогноза выбросоопасности в условиях угольных шахт и рудников.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы механики сплошных сред, механики пористых газонасыщенных сред и механики разрушения, механики движения жидкости и газа в газонасыщенных пористых средах; методы статистической обработки данных для получения математических зависимостей результатов гидродинамического и взрывного воздействий на горный массив.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный способ поинтервального гидроразрыва на выбросоопасных угольных пластах малой и средней мощности при установленных значениях рабочих параметров обеспечивает создание зоны интенсивной техногенной трещиноватости радиусом 8-12 м от оси скважины и равномерную по трассе проведения выработки, что в совокупности с другими мероприятиями снижает вероятность возникновения или исключает ГДЯ.

2. Выявлено, что в условиях рудных месторождений наличие органогенных газонасыщенных доломитов и геологических нарушений в приконтурном массиве предопределяет возможность проявления ГДЯ при проведении выработок.

3. Определен механизм возникновения ГДЯ при проведении выработок на рудных месторождениях, заключающийся в следующем: в газонасыщенных

доломитах в зонах геологических нарушений под действием опорного давления на контуре выработки происходит образование систем трещин с избыточным давлением газа; сейсмическое воздействие буровзрывных работ (БВР) инициирует резкое повышение давления газа и лавинообразное развитие этих трещин, что приводит к выбросу пород и газа.

4. Совокупность полученных организационных, технических и методических решений по повышению эффективности передового торпедирования ГГМ на рудных месторождениях повышает безопасность БВР и снижает интенсивность или исключает ГДЯ.

5. Установлена связь изменения в структуре естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) в условиях ГГМ с изменениями локальных напряжений под давлением свободного газа в трещинах за контуром выработки, на основании которой предложен критерий опасности для локального прогноза ГДЯ по показателям ЕЭМИ как на угольных, так и на рудных месторождениях, при этом в первом случае критерием опасности является рост частоты следования электромагнитных импульсов сравнительно малой энергии, а во втором – значительный (в 2 и более раз) рост энергии и частоты событий со сравнительно высокой энергией.

Обоснованность и достоверность положений, выводов и рекомендаций. Научные результаты диссертации получены на основе фундаментальных положений механики пористых газонасыщенных сред, механики взрывного разрушения, гидродинамики сжимаемых вязких жидкостей. Их достоверность подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов аналитических, лабораторных и шахтных экспериментальных исследований, воспроизводимостью выявленных закономерностей и идентифицированных параметров в реальном диапазоне режима гидродинамического и взрывного воздействия; высокими значениями коэффициентов корреляции и корреляционных отношений (0,7–0,9) при надежности 0,9–0,95 и уровне значимости 0,75, высокоэффективным промышленным применением способов предотвращения ГДЯ на трех шахтах «ММК-Уголь» и рудниках «Интернациональный» и «Удачный» ПАО «АЛРОСА».

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Установлены эффективные параметры поинтервального гидроразрыва угольного пласта как способа борьбы с ГДЯ в газонасыщенном горном массиве при проведении выработок.

2. Установлено влияние газоносности, газопроницаемости и пористости вмещающих пород на закономерности проявления ГДЯ на рудных месторождениях и их отличие от подобных явлений на угольных месторождениях.

3. Установлены закономерности и отличительные особенности проявления ГДЯ при проведении выработок в газонасыщенных массивах горных пород на рудных месторождениях.

4. Установлены эффективные параметры буровзрывных работ при проведении передового торпедирования массива, обеспечивающие снижение интенсивности ГДЯ при проведении выработок на рудных месторождениях.

5. Подтверждена эффективность прогноза ГДЯ, основанного на регистрации показателей ЕЭМИ пород газонасыщенного горного массива, при проведении выработок на рудных и угольных месторождениях.

Научное значение работы заключается в установлении закономерностей проявления ГДЯ для различных горно-геологических и горнотехнических условий проведения выработок и изменения напряженно-деформированного состояния массива после его торпедирования и гидродинамического воздействия на угольный пласт.

Практическое значение работы состоит в разработке системы контроля выбросоопасности угольных пластов на шахтах Кузбасса и пород на рудниках ПАО «АЛРОСА», разработке методик прогноза выбросоопасности угольных пластов и горного массива на рудниках путем оценки их напряженного состояния и газонасыщенности, а также применения разработанных способов гидровоздействия на выбросоопасные угольные пласты и газонасыщенные горные породы взрывчатыми веществами в режиме камуфлетного взрывания.

Разработаны методики экспериментально-промышленных испытаний способов предотвращения газодинамических явлений на руднике «Интернациональный» ПАО «АЛРОСА» и угольных шахтах Кузбасса.

Применение разработанных способов и средств предотвращения газодинамических явлений на шахтах и рудниках позволяет не менее чем в 2 раза повысить производительность труда, а также значительно снизить себестоимость добываемого угля.

Реализация работы. Результаты проведенных исследований использованы на угольных шахтах «Чертинская-Коксовая» и им. С. Д. Тихова ООО «ММК-Уголь», а также руднике «Интернациональный» ПАО «АЛРОСА».

Представление работы. Основные положения и содержание работы докладывались на научных симпозиумах и конференциях «Неделя горняка» (2015–2025 гг.), «Уголь и майнинг России» (2019–2024 гг.), а также на научных семинарах ВостНИИ и АО КФ «ВНИМИ» (2018–2024 гг.).

Постановки задач и методы их решения детально излагались и обсуждались на семинарах и совещаниях, руководимых проф., д.т.н. В. С. Зыковым; проф., д.т.н.

А. В. Джигрином; проф. РАН, д.т.н. В. А. Еременко; д.т.н. К. С. Коликовым и д.т.н. В. В. Мельником.

Личный вклад автора заключается в постановке цели, идеи и формулировании задач исследований и научных положений, выборе методов исследований, проведении аналитических исследований процессов и численного моделирования ГДЯ в очистных и подготовительных забоях, разработке методики лабораторных исследований процессов ГДЯ в угольных шахтах и на рудниках ПАО «АЛРОСА», а также в разработке способов прогноза и борьбы с ГДЯ на угольных шахтах и горнорудных предприятиях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 работ, из них 11 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ (в том числе 11 по профилю научной специальности), 2 – в международной базе данных Scopus, 3 – в прочих изданиях, 6 нормативных документов и 8 патентов.

Объем и структура работы. Текст диссертации включает в себя введение, шесть глав, заключение и приложения, список использованных источников состоит из 235 наименований, содержит 50 таблиц, 177 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы. Приведен обзор работ по тематике диссертации. Сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В **главе 1**, носящей вводный характер, приведен обзор существующих локальных способов предотвращения ГДЯ, характеристики трудоемкости технических решений и динамика роста проявлений за последние десятилетия на угольных шахтах и рудниках.

Повышение устойчивости и безопасности выработок в массивах газонасыщенных горных пород может быть обеспечено разработкой и внедрением более эффективных и менее трудоемких мероприятий по предотвращению выбросов, а также средств прогноза для их выполнения.

Фундаментальные теоретические положения и практические рекомендации по прогнозу и предотвращению газодинамических явлений в виде выбросов угля, пород и газа сформулированы в трудах Абрамова Ф. А., Авершина С. Г., Белова В. И., Боброва И. В., Большинского М. И., Быкова Л. Н., Егорова П. В., Захарова В. Н., Зорина А. Н., Зыкова В. С., Иванова Б. М., Карпова А. М., Клишина В. И., Кузнецова С. В., Лидина Г. Д., Линькова А. М., Лысикова Б. А., Маловой Г. В., Мирера С. В., Мурашева В. И., Мюллера Р. Я., Николина В. И., Ольховиченко А. Е., Петросяна А. Э., Петухова И. М., Ходота В. В., Печука И. М.,

Попова В. С., Пузырева В. Н., Ренева А. А., Скочинского А. А., Степановича Г. Я., Фейта Г. Н., Фролова Г. Д., Хмары О. И., Христиановича С. А., Черницына Н. Н., Чернова О. И., Шадрина А. В., Ягунова А.С. и др.

Известны и широко применяются следующие локальные способы предупреждения внезапных выбросов: бурение опережающих скважин; гидроотжим призабойной части; гидрорыхление пласта; гидровывывание опережающих полостей и щелей; низконапорное увлажнение; торпедирование угольного массива и пр. Выбор конкретного способа определяется горно-геологическими условиями и используемой технологической схемой проведения выработок. В значительной мере на выбор способа и тщательность его исполнения оказывает влияние трудоемкость и стоимость необходимых технических и технологических решений.

Так, удельное время бурения опережающих скважин составляет порядка 3 часов на 1 пог. м выработки. И эффективное наложение зон их слипания составляет около 4 м, что приводит к необходимости повторения цикла разгрузки через 4 м подвигания. Гидровоздействие и торпедирование создают лучшую, интенсивную трещиноватость и выполняются за ремонтную смену, удельное время мероприятий составляет 1,5–2 ч/пог. м. Низконапорное увлажнение имеет другое преимущество: оно выполняется через длинные скважины, и, несмотря на длительное время нагнетания, удельное время мероприятий составляет 0,6–0,7 ч/пог. м.

Отсюда возникла идея объединения преимуществ гидровоздействия и низконапорного увлажнения, т. е. заблаговременного создания по трассе выработки протяженной зоны с интенсивной трещиноватостью для повышения эффективности дегазации пласта, безопасности и темпа проведения выработок.

Однако разнообразие ГГМ не ограничивается угольными пластами. Известны проявления ГДЯ в газонасыщенных песчаниках Донецкого угольного бассейна, газонасыщенных доломитах на руднике по добыче меди в Польше, газонасыщенных известняках и доломитах на алмазных месторождениях в Якутии. Последние стали источником порядка 50 задокументированных ГДЯ за последние 8 лет. Таким образом, возникла идея проанализировать эти события, установить факторы выбросоопасности и определить механизм формирования выбросов, а в целях обеспечения устойчивости выработок на таких месторождениях провести адаптацию известных способов предупреждения внезапных выбросов.

Важным условием надлежащего исполнения мероприятий по предотвращению выбросов является наличие доступных и надежных способов их прогноза. Поскольку определение эффективных параметров воздействия на ГГМ невозможно без контроля НДС, ударо- и выбросоопасности, то проводимые

шахтные эксперименты и опытно-промышленные работы сопровождались несколькими прямыми и косвенными геофизическими методами оценки состояния горного массива. Выявленная устойчивая связь показателей ЕЭМИ пород массива с его локальными напряжениями, в том числе под воздействием давления газа в трещинах в приконтурной части выработок, подвигла к идее сравнительного анализа показателей ЕЭМИ для различных ГГУ и разработке соответствующих правил прогноза выбросоопасности.

Глава 2 посвящена обоснованию эффективных параметров гидровоздействия на выбросоопасный угольный пласт для предотвращения ГДЯ.

Поинтервальное гидровоздействие разработано как способ повышения эффективности барьерной дегазации угольных пластов в шахтных условиях с целью снижения выбросоопасности угольного пласта. Его целью является увеличение проницаемости обработанной зоны угольного пласта по трассе проведения выработки, что происходит за счет образования в пласте новых трещин и раскрытия уже имеющихся естественных трещин.

Основная идея поинтервального гидроразрыва состоит в минимизации зоны воздействия рабочей жидкости на стенки скважины, вследствие чего напорно-расходные характеристики насосного оборудования используются полностью на ограниченном временном интервале, обеспечивая быстрое проникновение жидкости в массив и формирование протяженных трещин, которые значительно увеличивают дебит скважин барьерной дегазации.

Перед проведением поинтервального гидровоздействия отбуриваются скважины барьерной дегазации со следующими усредненными параметрами: длина скважин — 60–80 метров; диаметр скважин не менее 76–80 мм; глубина герметизации — 10 метров; удаление устья скважины от стенки выработки не менее 1,5 метра; угол разворота скважины относительно выработки соответственно 2–5°; расстояние между нишами по каждому боку выработки — 30 метров; число скважин из одной ниши по всем пластам — 1 шт.; неснижаемое опережение скважинами барьерной дегазации забоя выработки — 15 метров.

Для реализации поинтервального гидровоздействия используется комплекс специальных технических средств, среди них принципиально важным является разрывное устройство (рисунок 1), включающее два упруго расширяющихся рукава, между которыми установлен распределитель давления, предназначенный для регулирования давления рабочей жидкости в гидросистеме разрывного устройства.

Схема расположения оборудования для гидровоздействия в скважине показана на рисунке 2. Контроль параметров поинтервального гидроразрыва

осуществляется специальной контрольно-измерительной аппаратурой, которая включает в себя: манометр, расходомер и радиодатчик давления жидкости. Нагнетание жидкости при проведении поинтервального гидроразрыва производится специализированным или штатным насосным оборудованием, технические характеристики которого должны соответствовать расчетным значениям нагнетания.



Рисунок 1 — Разрывное устройство:
1, 2 — упруго расширяющиеся рукава;
3 — межпакерный клапан; 4 — наконечник запорный;
5 — муфта присоединительная

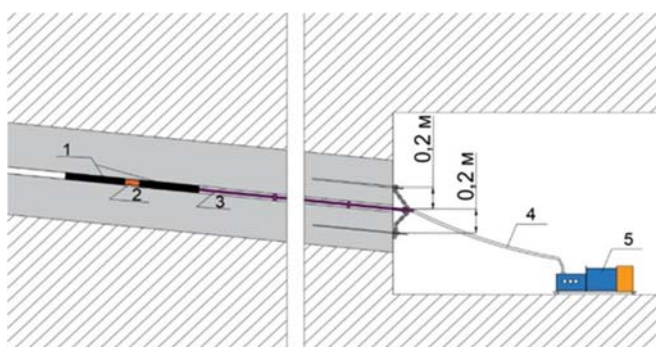


Рисунок 2 — Схема расположения оборудования: 1 — герметизатор; 2 — регулируемый распределитель давления (клапан); 3 — трубки (штанги) высокого давления; 4 — рукав высокого давления; 5 — насосная установка

Для ведения работ на пластах, склонных к внезапным выбросам угля и газа, разработана специальная схема поинтервального гидровоздействия с одной передней скважиной (рисунок 3).

Использован принцип низконапорного увлажнения, т. е. создания протяженной защищенной зоны по трассе выработки, что позволило снизить удельное время проведения мероприятий на 1 м проводимой выработки. Для повышения интенсивности трещиноватости в сравнении с низконапорным увлажнением используется поинтервальный гидроразрыв пласта. Это позволяет дополнительно уменьшить сроки выполнения мероприятий по предотвращению внезапных выбросов и значительно увеличить эффективность дегазации.

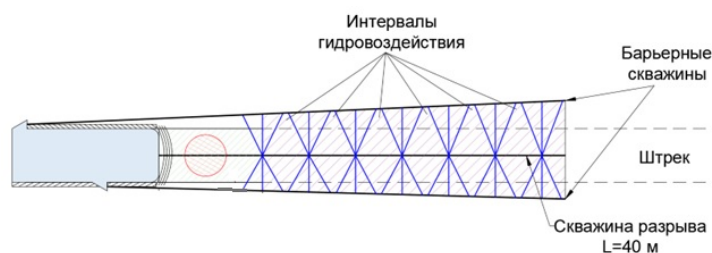


Рисунок 3 — Схема закладки передовой одиночной скважины для поинтервального гидровоздействия

Поставленная цель достигается тем, что методом гидроразрыва пласта расширяют естественные и создают искусственные трещины. Эти системы трещин соединяют скважину гидроразрыва с барьерными скважинами, которые подключены к вакуум-насосным установкам (рисунок 3).

При подвигании забоя под действием опорного давления происходит прорастание новых трещин, однако в них не возникает существенного избыточного давления газа, он удаляется через уже сформированные системы трещин в барьерные скважины.

Целевыми характеристиками гидроразрыва являются длина и раскрытие трещин, которые формируются в результате сложного взаимодействия управляемых и неуправляемых факторов в каждом конкретном случае. В шахтных условиях реально управляемыми оказываются скорость и время закачки, а также расстояние между интервалами гидроразрыва (пакерами) по длине скважины.

Для расчета параметров трещин разработано достаточное количество математических моделей, позволяющих оценить ожидаемые их значения. Как самые известные и неоднократно проверенные можно отметить: модель Перкинса–Керна–Нордгрена (РКН), Христиановича–Гиртсма–де Клерка (КГД) и радиальную модель.

В таблице 1 приведены зависимости, полученные из модели РКН для длины и раскрытия трещины, а также эффективного давления, где: E' — модуль плоской деформации, h — высота трещины, μ — вязкость жидкости. Сложность этих уравнений не позволяет разрешить их относительно скорости закачки q и времени закачки t , подставляя требуемые (желаемые) значения характеристик трещины и другие параметры.

Поэтому в работе проведены расчеты с подстановкой в уравнения таблицы 1 множественных комбинаций параметров исходных данных и определение соответствующих характеристик трещин.

Таблица 1 — Модель Перкинса – Керна – Нордгрена (РКН)

Длина трещины x_f , м	$x_f = 0,45 \left[\frac{E' q^3}{\mu h^4} \right]^{1/5} t^{1/5}$
Раскрытие трещины w , м	$w = 1,91 \left[\frac{q^2 \mu}{E' h} \right]^{1/6} t^{1/5}$

Затем выполнена фильтрация полученных комбинаций из условий минимально приемлемых значений длины и раскрытия трещины. После чего определены предельные и средние значения скорости, времени закачки и общего расхода жидкости (воды), при которых реализуются минимальные приемлемые для дегазации характеристики трещин (таблица 2).

Таблица 2 — Значения технологических параметров гидроразрыва, при которых выполняются минимальные требования по характеристикам трещин в модели РКН

Параметр	Минимум	Максимум	Среднее
	Технологические параметры		
Скорость закачки жидкости, л/мин	18	66	51,1
Время закачки жидкости, мин.	1	20	12,8
Объем закачанной жидкости, л	24	1320	654
Характеристики трещины			
Длина трещины, м	6	13	8,8
Ширина раскрытия трещины, мм	2	6	4,5
Давление раскрытия трещины, МПа	6	14	7,5

Как видно из таблицы 2, модель РКН прогнозирует минимальный расход, при котором характеристики трещин входят в приемлемый диапазон порядка 18 л/мин, время нагнетания может составлять от 1 до 20 минут, а средний расход на один интервал около 654 л. Эти значения были приняты в качестве ориентировочных при организации опытно-промышленных работ.

Для проверки работоспособности и эффективности предложенной схемы поинтервального гидровоздействия проведены опытно-промышленные работы в условиях угольных шахт Кузбасса. Совместно с Институтом угля СО РАН проведен комплекс исследований на базе уравновешенного гидравлического пакера. Экспериментальные и опытно-промышленные испытания проводились преимущественно на пластах малой и средней мощности (рисунок 4).

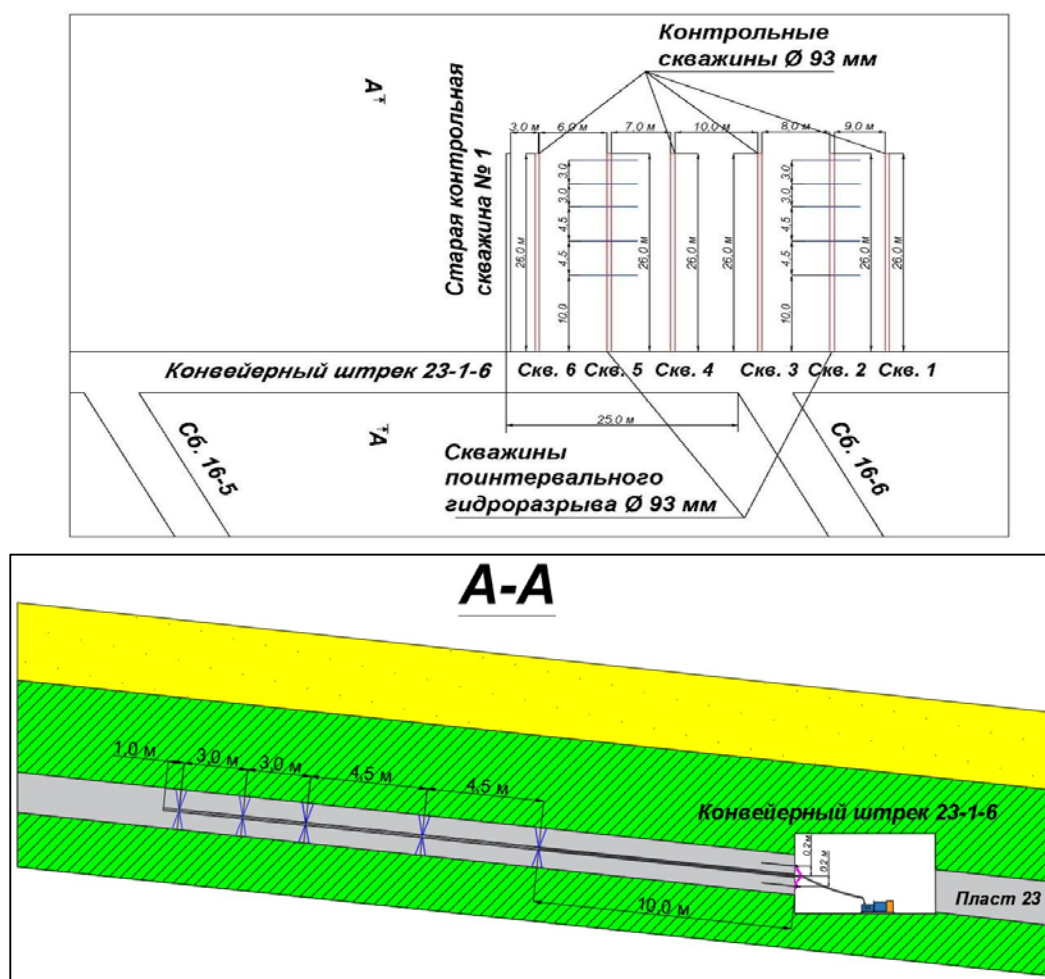


Рисунок 4 — Схема одного из промышленных экспериментов с поинтервальным гидровоздействием

Помимо характеристик трещин необходимо было определить эффективные расстояния между интервалами по длине скважины. Величина эффективного расстояния между интервалами в скважинах гидроразрыва определялась экспериментально по величине давления жидкости при различной величине интервалов (рисунок 5).

Падение уровня давления текущего интервала существенно ниже предыдущего. Это означает, что зоны трещиноватости от соседних интервалов объединились и не следует ожидать дальнейшего роста ширины зоны трещиноватости пласта.

Эксперименты полного цикла были проведены на опытных участках шахт «Чертинская-Коксовая» и им. С. Д. Тихова, в ходе которых регистрировались расходы жидкости и давление на опытных скважинах гидроразрыва, а также дебит метана (рисунки 4–6).

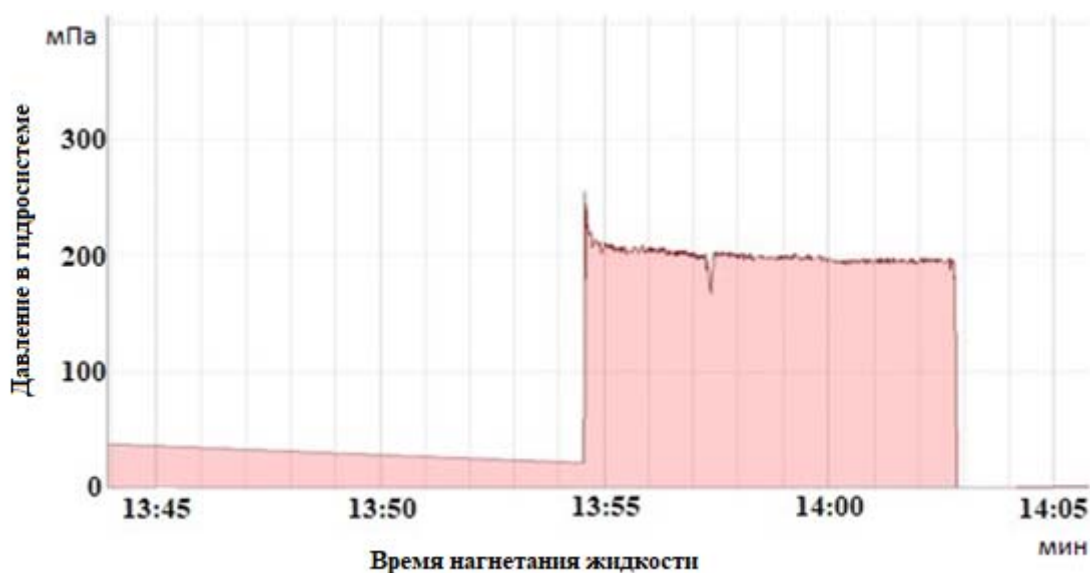


Рисунок 5 — График давления на скважине гидроразрыва № 5: интервал № 1, расстояние от устья скважины 24,5 м



Рисунок 6 — График изменения дебита метана на скважине гидроразрыва № 5

По результатам многократных промышленных испытаний установлено, что для пластов малой и средней мощности эффективное расстояние между интервалами гидровоздействия составляет 3–4,5 м в зависимости от свойств угольного пласта.

Ширина расчетной зоны гидровоздействия подтверждалась в шахтных условиях по истечению жидкости и повышению дебита метана из контрольных скважин, пробуренных на расстоянии до 10–12 м от разрывных (рисунок 4).

Анализ результатов шахтных исследований поинтервального гидроразрыва на пластах малой и средней мощности позволил сделать следующие выводы:

1. Достигается снижение остаточной газоносности пласта с 23–25 м³/т до 15 м³/т за 5–7 суток.

2. Расстояние от скважины гидроразрыва до скважины барьерной дегазации может составлять 8–12 м.

3. Оптимальный объем закачиваемой жидкости находится в интервале $V_{\text{зак.}} = 200\text{--}300$ л на один интервал, а время нагнетания $t_{\text{зак.}} = 4\text{--}10$ мин. при расходе 15–45 л/мин.

4. Давление рабочей жидкости при проведении поинтервального гидровоздействия на пласт наблюдается в диапазоне $P_{\text{наг.}} = 10\text{--}28$ МПа и зависит в большей степени от прочностных свойств и ориентации систем природных трещин относительно оси скважины, чем от глубины ведения горных работ.

Таким образом, по давлению режим поинтервального гидровоздействия соответствовал гидрорасчленению и гидрорыхлению. В то же время, с учетом активной длины скважины, фактические параметры режима нагнетания и параметры образованных зон гидровоздействия соответствуют параметрам режима гидроразрыва пласта.

По результатам шахтных наблюдений на выбросоопасных пластах выявление категории ОПАСНО в подготовительных забоях достигал 15–20 раз в месяц, при этом из-за трудоемкости бурения разгрузочных скважин темпы проведения выработок составляли 60–80 м/мес. При использовании предложенного способа категория ОПАСНО фиксируется в забое не более 6 раз в месяц, за счет этого достигается повышение безопасности проведения выработок при увеличении темпов их проведения до 120–140 м/мес. в идентичных условиях.

По совокупности полученных результатов можно утверждать, что поинтервальное гидровоздействие на выбросоопасный угольный пласт при установленных значениях рабочих параметров формирует в пласте протяженную и равномерную техногенную трещиноватость, что в совокупности с другими мероприятиями снижает вероятность или исключает проявление ГДЯ.

В главе 3 описываются факторы, определяющие возможность проявления ГДЯ, полученные по результатам лабораторных исследований свойств пород и натурных наблюдений ГГМ на рудных месторождениях.

Проблема возникновения ГДЯ до недавнего времени рассматривалась исключительно для угольных шахт и месторождений калийных солей. В мировой практике до 2009 г. выбросоопасность других пород не встречалась или игнорировалась и, следовательно, факторы возникновения ГДЯ не исследовались.

В работе проведен анализ особенностей горно-геологических условий рудника «Интернациональный», где с 2013 г. фиксировались серии проявлений ГДЯ на глубине 790–800 м и далее по мере проведения подготовительных и капитальных горных выработок. Данный рудник размещен в теле Толбачанской

свиты и характеризуется как типичный представитель месторождений Якутии, которые отличаются заметной региональной нефтегазоносностью вмещающих отложений в виде доломитов и известняков с неравномерным распределением газов, битумов и нефти вследствие различных коллекторских свойств отдельных слоев.

Лабораторные исследования газонасыщенности, газодинамических характеристик и физико-механических свойств горных пород рудника «Интернациональный», предопределяющих газодинамические явления, проведены в работах других авторов, где сделаны выводы о высокой вероятности газодинамических явлений. Отдельно выделены доломиты (газоносность 0,05–2,30 м³/м³, начальная скорость газовыделения 0,81 л/мин) и доломиты глинистые (газоносность 0,05–2,86 м³/м³, начальная скорость газовыделения 1,55 л/мин), которые характеризуются как наиболее вероятные источники выбросов.

Чтобы подтвердить эту характеристику и выявить дополнительные факторы возникновения ГДЯ, проведен анализ актов комиссий по расследованию газодинамических явлений на руднике «Интернациональный». Всего с 2013 по 2023 г. было зарегистрировано 47 событий, сопровождавшихся выбросами породы и газа.

Прежде всего фиксировался важный признак газодинамического происхождения выброса – наличие зоны отрыва в виде полусферической или полуэллиптической полости, в которой породы раздроблены до песчано-древяной фракции, наблюдаются мелко-плитчатые отслоения и шелушение.

В качестве источника выброса — слоев, в которых сформировалась полость выброса, — в актах зафиксированы:

1. Доломиты органогенные, бежевые, коричневато-серые, окремненные, волнисто-слоистые, с интенсивной концентрически-зональной трещиноватостью, битуминозные, нефтесодержащие, плотные, крепкие, с повышенной газонасыщенностью (24 случая).

2. Доломиты органогенные, песчанистые, бежевые, коричневато-серые, окремненные, волнисто-слоистые, с интенсивной субвертикальной плитчатой трещиноватостью, битуминозные, нефтесодержащие, плотные, крепкие, с повышенной газонасыщенностью (23 случая).

Мощность этих слоев варьируется от 0,5 до 4,7 м. В большинстве случаев (39 из 47) вблизи места выброса обнаруживались проявления геологических нарушений – породы с низкой крепостью и высокой трещиноватостью, а также перемятые и деструктурированные слои и прослойки, что связано с резким изменением НДС массива. Результаты визуальной оценки подтверждаются на

карте отметками выявленных геологических нарушений. Так, на рисунке 7 приведен фрагмент план-схемы горных работ с нанесенными осевыми линиями и зонами влияния нарушений, где эта взаимосвязь наблюдается для событий за 2017–2018 гг.

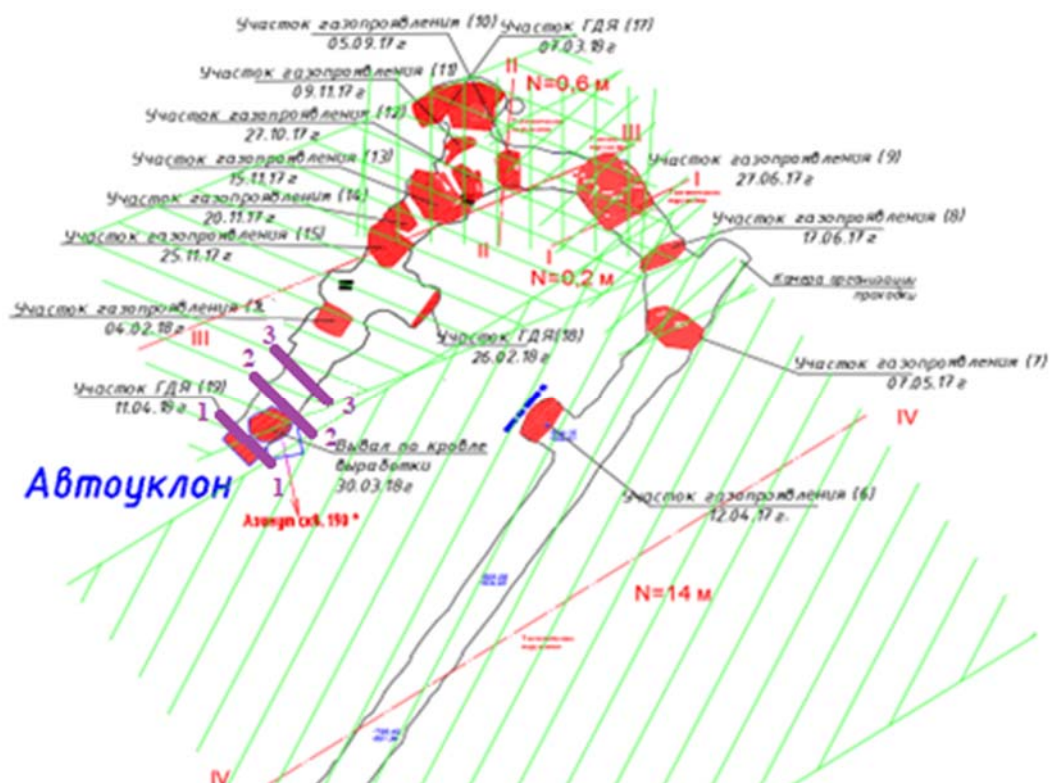


Рисунок 7 — План-схема и последовательность ГДЯ за 2017–2018 гг. в горных выработках рудника «Интернациональный». Штрих-пунктиром обозначены осевые линии нарушений, заштрихованные области — расчетные зоны влияния нарушений

Вместе с описательной частью из отчетов были извлечены данные о показателях выброса, в т. ч. (рисунок 8): максимальной концентрации метана, %; объеме выделившегося газа, м³; объеме выброшенной породы, м³; мощности газоносного слоя (слоя-источника), м.

Параметры напряжений в массиве оценивались методами частичной скважинной разгрузки и контурного профилирования выработок по ЕЭМИ на различных участках шахтного поля. По результатам серии измерений зафиксированы следующие параметры напряжений $\sigma_1 = 3,1...23,0$ МПа; $\sigma_2 = 1,3...8,6$ МПа; $\phi = 29...34^\circ$ (рисунок 9).

По результатам контурного профилирования ЕЭМИ автоуклона определено, что в тупиковой части массив находится в уравновешенном разгруженном состоянии (рисунок 10).

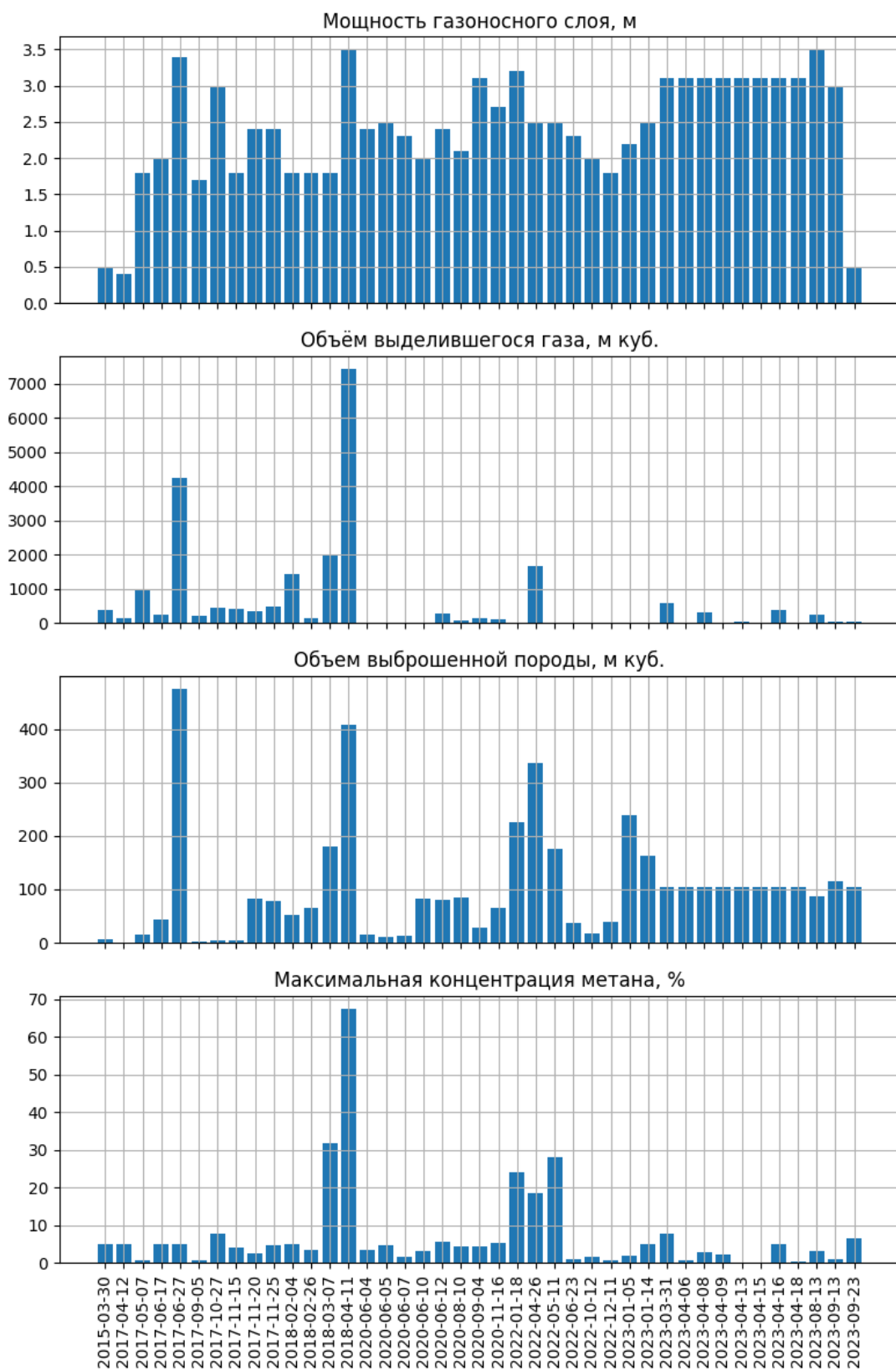


Рисунок 8 — Показатели выбросов на руднике «Интернациональный» за 2013–2023 гг.

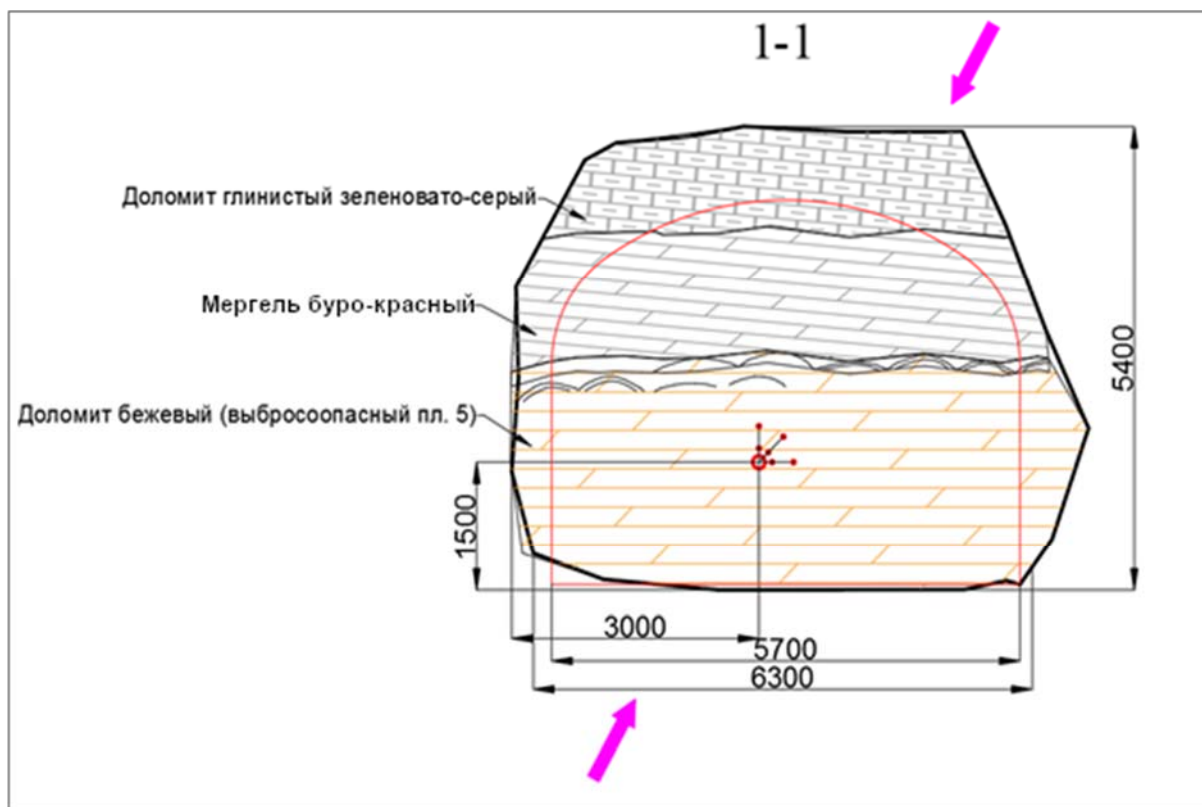


Рисунок 9 — Сечение забоя спирального съезда ЭБ № 11 (фиолетовые стрелки показывают направление главных напряжений)

Следует также отметить тот факт, что на разных участках проведения работ с помощью прибора ANGEL-M на автоуклоне обнаруживались изменения направления повышенных напряжений, при этом на участке выработки в районе сечения 2-2 вертикальные напряжения преобладали над горизонтальными, а в районе сечения 3-3 горизонтальные напряжения преобладали над вертикальными (рисунки 10–12). Поле напряжений в массиве пород крайне неравномерное как по величине, так и по направлению на различных участках шахтного поля. Это объясняется интенсивной нарушенностью массива.

На рисунке 7 показаны зоны влияния геологических нарушений. Видно, что все ГДЯ произошли в зонах тектонической нарушенности. Установлено, что толщина газоносного слоя хорошо коррелирует с объемами выделившегося газа и выброшенной породы с коэффициентом корреляции Пирсона (r) — 0,717 и 0,751 соответственно.

Максимальная концентрация метана проявляется как вторичный показатель, который лучше коррелирует с объемами выделившегося газа ($r = 0,836$) и выброшенной породы ($r = 0,603$), чем с мощностью газоносного слоя ($r = 0,489$). Других значимых взаимосвязей в показателях выбросов обнаружено не было.



Рисунок 10 — Амплитудная диаграмма направленности ЕЭМИ в забое автоуклона, мкВ (разрез 1-1)

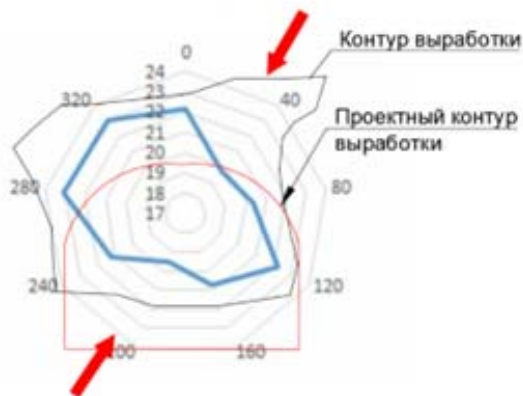


Рисунок 11 — Амплитудная диаграмма направленности ЕЭМИ в 10 м от забоя автоуклона (разрез 2-2, красные стрелки показывают направление повышенных сжимающих напряжений)



Рисунок 12 — Амплитудная диаграмма направленности ЕЭМИ в 15 м от забоя автоуклона (разрез 3-3, красные стрелки показывают направление повышенных сжимающих напряжений)

Таким образом, выявлены факторы, определяющие возможность проявления ГДЯ по результатам анализа данных лабораторных исследований и шахтных наблюдений свойств пород ГГМ на рудных месторождениях на примере рудника «Интернациональный».

Показано, что возможность проявления ГДЯ при проведении выработок на рудных месторождениях определяется наличием газонасыщенных доломитов и геологических нарушений в приконтурном массиве, вызывающим резкое изменение НДС породного массива.

В главе 4 проведен анализ возможных механизмов возникновения ГДЯ в условиях ГГМ на рудных месторождениях на основе численного моделирования.

Для актуальных на момент выполнения опытно-промышленных работ условий на автоуклоне и спиральном съезде рудника «Интернациональный» по полученным от предприятия данным определены параметры модели горнотехнической системы выработок, в которых могут сложиться обстоятельства, способные привести к ГДЯ. Модель создавалась на основе принятой в проекте рудника системе подготовительных выработок, в том числе, в перспективных блоках спирального съезда на абсолютных отметках –810 м ... –1310 м (Н = 1210...1710 м) и автоуклона на абсолютных отметках –830 м ... –1330 м (Н = 1230...1730 м). По результатам расчетов проведена оценка опасности ГДЯ для различных сценариев выхода выбросоопасного доломита на забой горной выработки (рисунок 13).

Для определения зон и условий нарушенности в массиве использован известный коэффициент запаса прочности КЗП (SFA – англ): $KЗП = (\sigma_c + q\sigma_3)/\sigma_1$, где σ_c — предел прочности пород на одноосное сжатие, МПа; σ_1 — главное максимальное напряжение, МПа; σ_3 — главное минимальное напряжение, МПа; коэффициент $q = (1 + \sin\varphi)/(1 - \sin\varphi)$; φ — угол внутреннего трения породы в массиве, град.

Также известно, что на больших глубинах под действием значительных сил сжатия вокруг выработок наблюдается образование параллельных контуру трещин. Это трещины растяжения, которые образуются несмотря на объемное сжатие. Для учета этого фактора использована относительная деформация, т.к. при растяжении порядка $(150...250)\mu\epsilon$ происходит образование и раскрытие трещин в массиве ($\mu\epsilon = \epsilon \cdot 10^{-6}$, где ϵ — относительная деформация растяжения). Следовательно, можно предположить, что развитие трещиноватости пород на больших глубинах и повышение давления газа в массиве может спровоцировать ГДЯ. Рассматривается условие, что граница полости от внезапного выброса должна проходить по линии $150\mu\epsilon$, и чем больше размеры в пространстве зоны $(150...250)\mu\epsilon$, тем выше потенциал ГДЯ по энергии и объёму выброса породы и газа.

На рисунках 14 и 15 представлены некоторые результаты расчетов. Установлено, что худшая ситуация по ГДЯ складывается при выходе доломита бежевого в кровле выработки (сценарий 1) и в почве выработки (сценарий 4). Сценарий 4 с точки зрения количественных характеристик НДС выбросоопасного пласта — худший. Объясняется это тем, что когда пласт с более низкими

прочностными свойствами выходит на забой с кровли или почвы, то находится в нагруженном (сжатом) состоянии, газовые коллекторы при этом закрытые.

Когда выбросоопасный пласт выходит на забой выработки по сценарию 2, он частично разгружается, образуются искусственные коллекторы, особенно на контакте разномодульных пород и в зоне опорного давления, происходит раскрытие трещин.

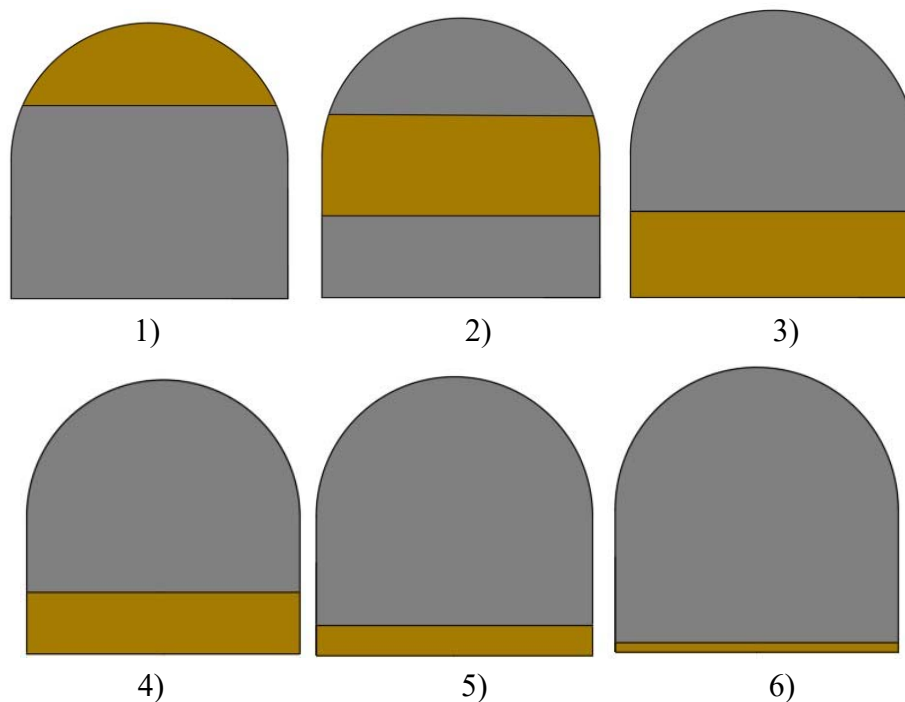


Рисунок 13 — Сценарии 1–6 выхода выбросоопасного доломита на забой выработки

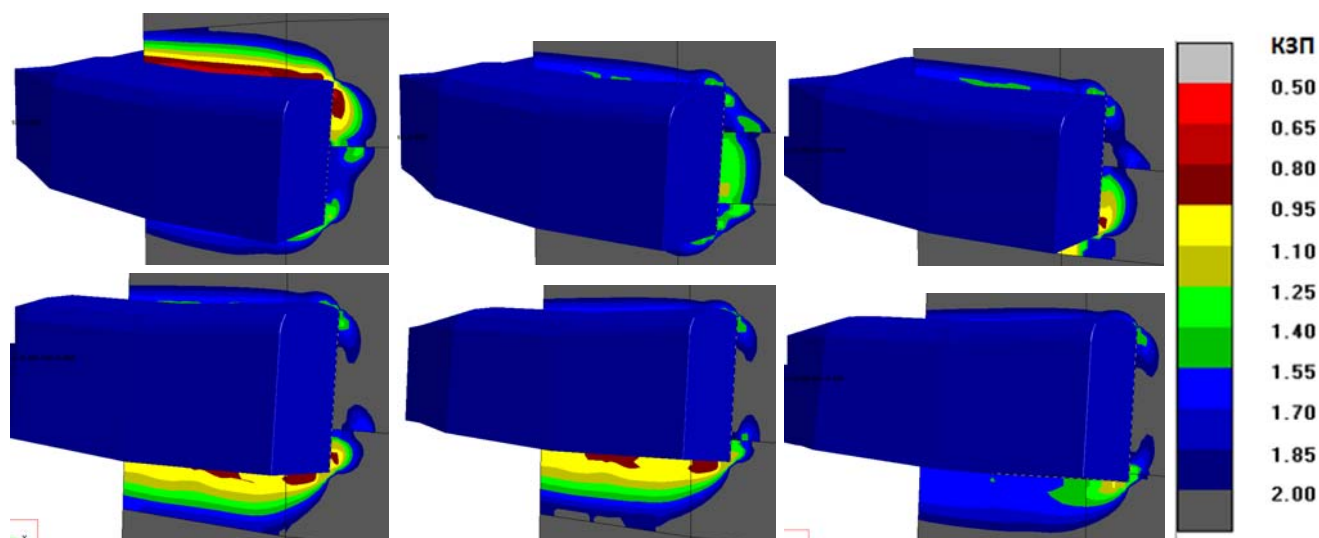


Рисунок 14 — КЗП: спиральный съезд, сетка 1.1, сценарии 1–6, глубина 1210 м от земной поверхности

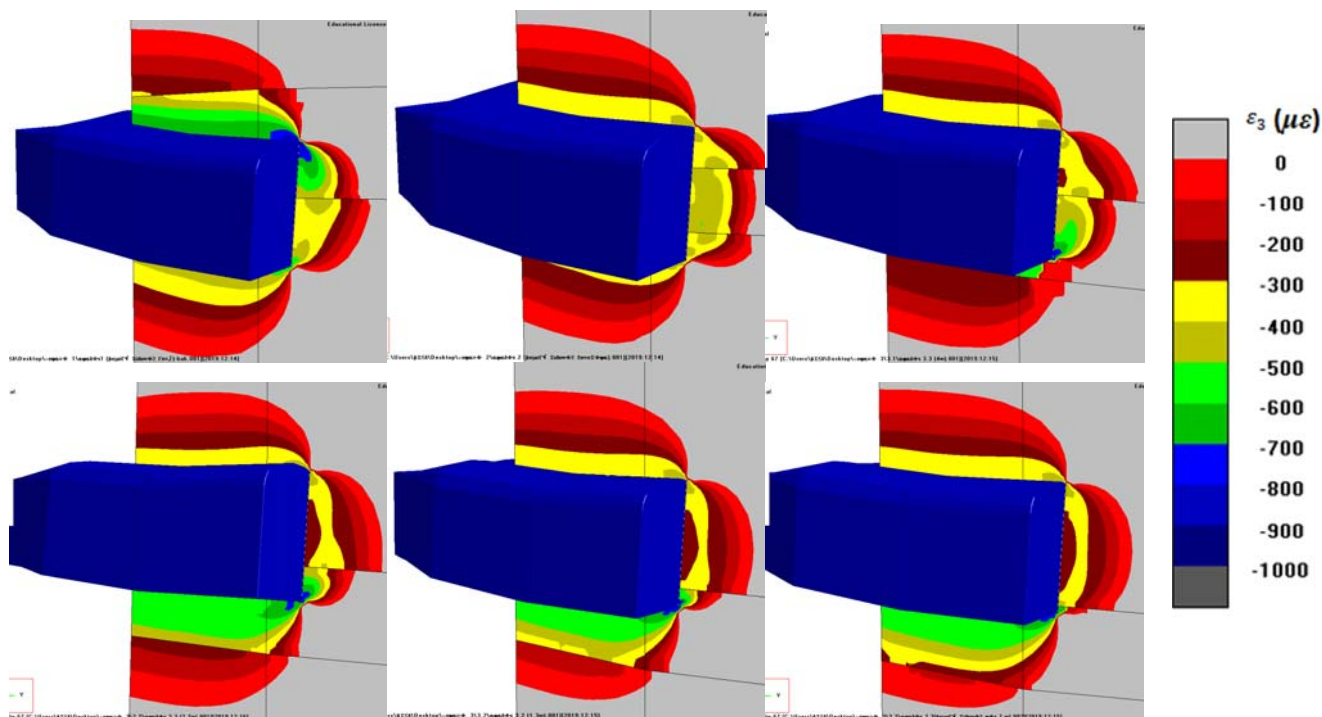


Рисунок 15 — Относительная деформация ε_3 : спиральный съезд, сетка 1.1, сценарии 1–6, глубина 1210 м от земной поверхности

Значения микродеформаций $\mu\varepsilon$ показывают потенциально опасные зоны пород массива, которые выбрасываются в выработку во время ГДЯ. Установлено, что на формируемые потенциальные зоны ГДЯ в бежевых доломитах влияет сечение выработок. Рекомендуется не превышать сечение выработок (высота H — 4,5 м, ширина B — 5,7 м).

Анализ по сценариям 1–3 зон влияния разломов на состояние спирального съезда и автоуклона на глубине ведения горных работ $H = 1710$ и 1730 м показал схожую качественную картину и закономерности распределения зон КЗП и ε_3 , но количественные характеристики изменились:

- величины избыточных напряжений $\Delta\sigma_1$ на глубине 1710 и 1730 м достигают 20 МПа, и встречаются случаи до 30 МПа;
- КЗП снижается менее 0,5;
- микродеформации достигают значений 800 $\mu\varepsilon$, в некоторых случаях более 1000 $\mu\varepsilon$.

Сравнительный анализ объемов выброшенной породы по результатам обработки актов комиссий по расследованию газодинамических явлений на руднике «Интернациональный» (см. выше) и результатов моделирования показывает, что они различаются в 3–5 раз (таблица 3), т. е. неучтенные в модели газодинамические процессы играют в формировании выбросов определяющую роль.

С учетом полученных результатов моделирования, описаний инцидентов с ГДЯ и особенностей технологии горных работ можно утверждать, что механизм возникновения ГДЯ при проведении выработок на рудных месторождениях состоит в следующем: под действием опорного давления от проводимой выработки происходит развитие трещиноватости пород на контуре, в выбросоопасных доломитах в зонах тектонического влияния геологических нарушений образуются системы трещин с избыточным давлением газа в них; под действием сейсмического воздействия от буровзрывных работ происходит резкое повышение давления газа в трещинах, лавинообразное развитие трещиноватости и выброс нарушенных пород газом.

Таблица 3 — Параметры разрушения контура выработок по результатам моделирования и по фактическим данным

Положение	Глубина полости, м		Объем выброшенной породы, м ³	
	Модель	Факт	Модель	Факт
На забое	0,5–0,65	1,8–2,5	21	78–106
На боках	0,5–0,55	0,5–1,6	8,9–10,2	15–52
В почве выработки	До 1,6	1,5–2,8	240	400–500
В кровле выработки	0,5–1	До 1,46–2,2	103	52–200

Т.к. по результатам моделирования установлено, что породы кровли выработки наиболее подвержены деформациям и наименее устойчивы при положении по сценарию 1, то проявление ГДЯ наиболее вероятно в кровле, в непосредственной близости у забоя, и может спровоцировать обрушение значительного объёма пород, что неоднократно наблюдалось на практике.

Разработаны и опробованы в ходе опытно-промышленных работ технические решения для крепи с высокой способностью поглощения энергии за счет применения специальных конических анкеров (cone bolt) в сочетании с защитной сетью MINAX с энергопоглощением до 6,5 кДж/м² при допустимых смещениях 300 мм и более.

Предложенное решение обеспечивает совместную работу всех элементов: при ГДЯ происходит смещение контура выработки с реализацией работы элементов податливости анкерной крепи совместно с поверхностной крепью, которая предотвращает прорыв породы в выработку.

В главе 5 выполнен анализ влияния взрывных работ на состояние ГГМ, дано обоснование параметров БВР и приведены результаты шахтных испытаний различных способов предотвращения ГДЯ при проведении выработок на рудных месторождениях.

Исследованиями, проведенными на шахтах Донбасса и руднике «Интернациональный» ПАО «АЛРОСА» установлено, что при снятии напряжений в породном массиве и давления газа в природных коллекторах проведение выработок не сопровождается выбросами пород и газа либо их интенсивность существенно снижается. В связи со сравнительно высокими прочностными свойствами массива наиболее перспективным способом разгрузки массива является воздействие взрыва. На протяженных участках горных выработок, проводимых по ГГМ на рудных месторождениях, для предотвращения внезапных выбросов пород и газа при снижении удельной трудоемкости мероприятий на 1 м проводимой выработки наиболее рациональным является сотрясательное взрывание, проводимое в длинных скважинах (10–50 м).

Идея заключается в заблаговременном создании протяженной зоны трещиноватости по трассе проведения выработки (рисунок 16-а). Параметры заряда рассчитываются таким образом, чтобы зона наведенной трещиноватости охватывала слои выбросоопасных пород и выходила за контур выработки не менее чем на 2 м (рисунок 16-б). Для отвода газа из массива предусматриваются скважины в забое или боках выработки. Работы проводятся в режиме сотрясательного взрывания.

Расчетная зона наведенной трещиноватости в боках выработки выходит за контур на 3,6 м, микротрещиноватости — на 9 м. Фактические параметры зоны трещиноватости определялись методом электромагнитного зондирования после проведения выработки с шагом замера 5 м (рисунок 17). В точке ТЗ зона разгрузки в боках не превышает 3 м, в Т0 сопоставима с ТЗ, в Т1 уже достигает 6 м и на участке заложения заряда ВВ — 11 м. По результатам шахтных экспериментов достигаются расчетные параметры разгрузки ГГМ.

Создание системы трещин, соединенных со скважинами для дренажа газа, позволяет заблаговременно дегазировать массив по трассе проведения выработки, предотвратить существенное повышение давления газа в природных и техногенных трещинах на контуре выработки от сейсмического воздействия взрывных работ при ее проведении. Это позволяет полностью предотвратить внезапные выбросы пород и газа при пересечении забоем участков геологических нарушений ГГМ либо в разы снизить их интенсивность.

Напряжения в сечении выработки будут сняты в том случае, когда сеть трещин между скважинами сомкнется и создадутся каналы для дренажа газа. Требуемый эффект будет достигнут при соблюдении определенного расстояния между скважинами и заданном диаметре заряда ВВ, при котором соблюдается взаимодействие этих зарядов на процессы разрушения.

Для подбора параметров БВР были сформулированы условия и построены модели на основе результатов Г.И. Покровского для расчета расстояния между скважинами и расстояния от заряда до свободной поверхности забоя.

Первое условие основано на том, что растягивающие напряжения σ_p в прямой волне сжатия от взрыва (схема на рисунке 18) являются главным фактором, определяющим возникновение радиальных трещин по линии одновременно взрываемых зарядов. Это предположение легло в основу расчета расстояния a между скважинами:

$$a \leq 2r_0 \sqrt[n]{\frac{2v\sigma_0}{(1-v)[\sigma]_p}}, \quad (1)$$

где a — расстояния между скважинами, м; r_0 — радиус заряда, м; v — коэффициент Пуассона; σ_0 — давление в скважине, например, на контакте заряд-порода $\sigma_0 = \frac{\rho_{ВВ} D^2 \rho_{п} C_p}{8(\rho_{ВВ} D + \rho_{п} C_p)}$; $\rho_{ВВ}$ — плотность ВВ, кг/м³; D — скорость детонации ВВ, м/с; $\rho_{п}$ — плотность окружающей заряд породы, кг/м³; C_p — скорость распространения продольной волны, м/с; $[\sigma]_p$ — предел прочности породы на растяжение, Па; n — коэффициент затухания волн напряжений $n = 2 - v/(1 - v)$.

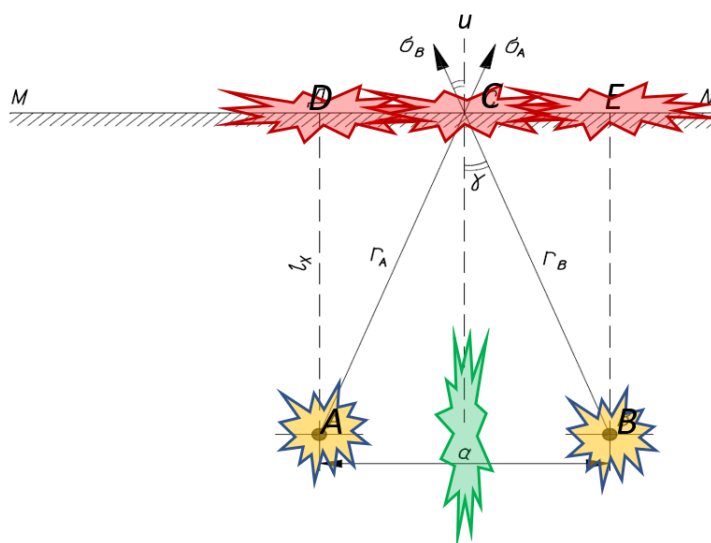


Рисунок 18 — Расчетная схема для определения расстояний между скважинами и от устья скважин до заряда ВВ

Второе условие основано на том, что необходимо располагать заряды на определенном расстоянии от устья скважины так, чтобы не происходили отколы породы. Наличие отколов в устье скважины может привести к развязыванию выброса пород во время взрывания зарядов.

Откол породы не произойдет в том случае, когда радиальные напряжения затухнут до величины, меньшей предела прочности на растяжение. Это предположение легло в основу расчета расстояния от центра заряда до свободной поверхности забоя l_x :

$$l_x \geq r_o^n \sqrt{\frac{\sigma_o}{[\sigma]_p}}, \quad (2)$$

где параметры выражения, как в (1).

Используемый в формулах радиус заряда предполагает его сферическую форму. При сильных диспропорциях трех линейных размеров заряда согласно работам Г.И. Покровского требуется вводить эквивалентный радиус сферического заряда. Для цилиндрической формы известна формула

$$r_o = k \sqrt[3]{R^2 L}, \quad (3)$$

где r_o — эквивалентный радиус, м; R — радиус цилиндрического заряда, м; L — длина (высота) цилиндрического заряда, м; k — коэффициент, зависящий от свойств ВВ и условий взрыва, принимаемый 0,8...0,9.

Полученные неравенства (1) и (2) полезны в практическом отношении, т. к. позволяют оценивать параметры БВР на эффективность и безопасность. В методическом плане неравенства позволяют определить зоны рациональных значений параметров, удовлетворяющих обоим выдвинутым условиям.

Неравенства (1) и (2) являются встречными и составлены одними и теми же параметрами, т. е. могут быть решены совместно. Также учитываем, что фактическое расстояние от заряда (центра) до свободной поверхности забоя составляет длину забойки (обозначим как Z) плюс половина длины заряда (L) (рисунок 20).

Если использовать в (1) и (2) $K_1 = \sigma_o / [\sigma]_p$ как *характеристику интенсивности воздействия взрыва* и подставить выражение для эквивалентного радиуса (3), то можно составить систему, которая будет полностью определять геометрию размещения зарядов:

$$\begin{cases} a \leq 2k\sqrt[3]{R^2L} \left(\frac{2v}{(1-v)} K_1 \right)^{1/n}, \\ l_x \geq \sqrt[3]{R^2L} (K_1)^{1/n}, \\ l_{fact} = Z + L/2. \end{cases} \quad (4)$$

В условиях действующего предприятия единственными управляемыми параметрами в (4) остаются радиус (диаметр) и длина заряда. Диаметр шпуровых зарядов, применяемых на рудниках, сильно дискретен, поэтому для выбора (оптимизации) параметров БВР фактически остается только длина заряда.

Графическое представление решения системы (4) для длины заряда L представлено на рисунке 19. Заштрихованная область показывает зону совместного решения для расстояния между скважинами и расстояния от заряда до свободной поверхности забоя. Положение линии $l_{fact}(L)$ определяет возможность выбора фактической длины заряда из разрешенной области. Для сравнения показаны три случая K_1 из характерного диапазона дробления ($100 < K_1 < 1000$). Видно, что подобрать длину заряда при других фиксированных параметрах так, чтобы выполнить условия (1) и (2), удастся, например, при $K_1 = 400$.

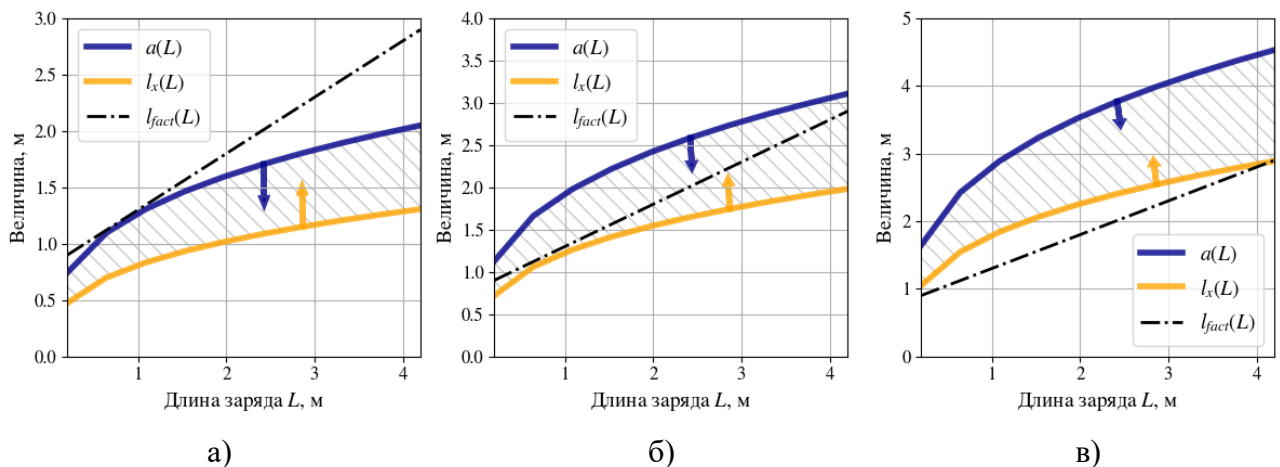


Рисунок 19 — Определение зоны рациональных параметров БВР при установленных характеристиках пород и ВВ: $v = 0,25$; $R = 0,01$ м; $Z = 0,8$ м;
а) $K_1 = 200$, б) $K_1 = 400$, в) $K_1 = 750$

На руднике «Интернациональный» по трассам проведения подготовительных горных выработок в отм. -790 м и ниже в зависимости от положения слоев выбросоопасных пород в ходе опытно-промышленных испытаний установили эффективные параметры торпедирования массива по общей схеме на рисунке 20.

Влияние БВР на состояние массива оценивалось по изменению амплитуды ЕЭМИ после каждого из этапов, газообильности выработок, параметрам разгрузки

приконтурного массива по результатам электромагнитного зондирования. Отмечено, что после торпедирования массива, как правило, происходит повышение амплитуды импульсов, что свидетельствует об интенсивном трещинообразовании за контуром.

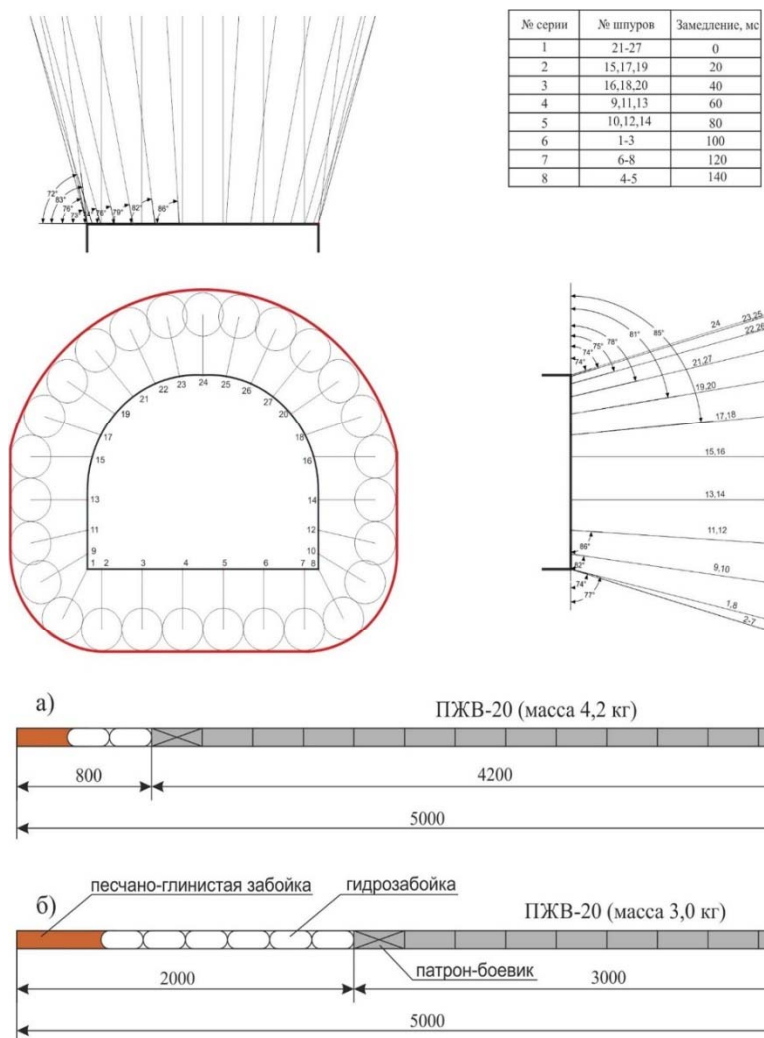


Рисунок 20 — Общая схема комплекта скважин для торпедирования, конструкция зарядов и ступени замедления (5 м): а — конструкция заряда при первом цикле торпедирования; б — конструкция заряда при последующих циклах торпедирования

После цикла отбойки фиксировалось снижение излучения практически в 2 раза, что свидетельствует об эффективной разгрузке вмещающего массива. Это также подтверждается результатами контурного профилирования по ЕЭМИ до и после отбойки (рисунок 21).

По результатам электромагнитного зондирования фиксировалась зона разгрузки 2-3 м за контуром выработки, что соответствует требуемым параметрам от передового торпедирования (рисунок 22).

Также произведена оценка изменения характеристик ГДЯ со временем, в частности, по границе 2022 года, когда на руднике стали применяться технологии

торпедирования и сотрясательного взрывания для разгрузки выбросоопасных пород. На рисунке 7 события № 1–27 произошли с 2013 по 2021 г., а № 28–47 с 2022 по 2023 г. Статистические характеристики в группах приведены в таблице 4, где показано заметное снижение разброса (дисперсии) объемов выбросов — как по объему выброшенных пород, так и по газу, а также ~ 4-кратное снижение среднего объема выброшенного газа.

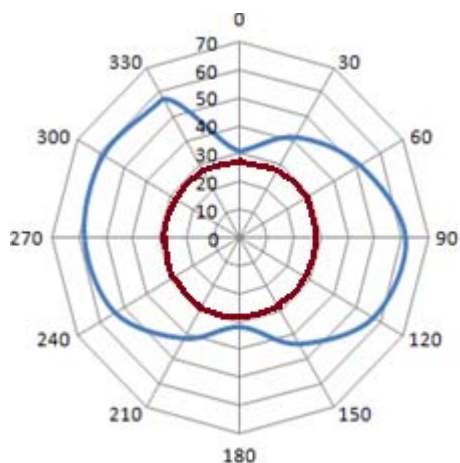


Рисунок 21 — Амплитудные диаграммы направленности ЕЭМИ до (синий контур) и после (красный контур) цикла отбойки, мкВ

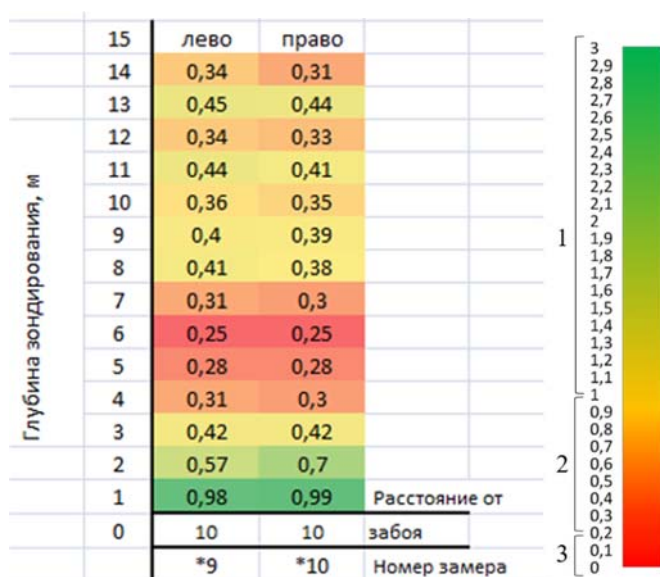


Рисунок 22 — Глубина разгрузки массива в боках выработки по результатам электромагнитного зондирования прибором ANGEL-M при ее проведении с передовым торпедированием пород (1 — сильнотрещиноватые ($F \geq 1,0$); 2 — трещиноватые ($0,20 \leq F < 1$); 3 — трещиноватость отсутствует либо в зачаточном состоянии ($F = 0,01 \div 0,20$))

Таблица 4 — Статистические характеристики объемов выбросов в группах по годам

Год	Количество выбросов	Объем выброшенной породы, м ³		Объем выделившегося газа, м ³	
		Среднее	Стандартное отклонение	Среднее	Стандартное отклонение
До 2022	27	93,2	131,2	1082,6	1831,8
После 2022	20	122,8	64,5	273,3	450,9

Согласно t -критерию Стьюдента для средних объемов выброшенной породы p -значение базовой гипотезы о равенстве составило 0,434, а для газа — 0,097. При уровне значимости $\alpha = 0,1$ по газу $p < \alpha$. Таким образом, базовая гипотеза о равенстве средних между группами по границе 2022 года отвергается и действенность мер по передовому торпедированию имеет статистическое подтверждение.

Таким образом, установлены эффективные параметры буровзрывных работ при проведении передового торпедирования массива, обеспечивающие снижение интенсивности ГДЯ при проведении выработок на рудных месторождениях.

В главе 6 приводится методика локального прогноза ГДЯ по показателям ЕЭМИ пород горного массива.

В настоящее время актуальным является вопрос организации на подземных горнодобывающих предприятиях многофункциональной системы безопасности. В число наиболее трудных задач по выполнению этого положения входит создание системы контроля и прогноза ГДЯ.

Как указано выше, ГДЯ на рудных месторождениях происходят в зонах тектонического влияния геологических нарушений. Важной задачей прогноза данных явлений является заблаговременное определение положения пересечения этих зон забоями. Решение этой задачи достигается повышением точности геологического прогноза с применением бурения керновых скважин в выработке и их каротажем.

По результатам шахтных испытаний методики прогноза установлено, что положение участков, опасных по проявлению ГДЯ, достоверно определяется по изменению амплитуды электромагнитных импульсов (рисунок 23).

Локализация зон нарушений, опасных по проявлению ГДЯ, производится на основе результатов каротажа скважины при изменении показателей ЕЭМИ на величину 5–10 % A_{max} от фонового значения A_{ϕ} .

Далее производится прогноз выбросоопасности перед каждым циклом проведения выработок. При зондировании забоя на потенциально выбросоопасных участках в условиях рудника «Интернациональный» обоснованы пороговые значения ЕЭМИ, соответствующие категории ОПАСНО: $A > 56$ мкВ, $B < 0,200$ и $A > 23$ мкВ. Превышение показаний свыше этих значений свидетельствует о приближении забоя к зоне геологического нарушения, опасной по проявлению внезапных выбросов пород и газа, на 3–7 м (рисунок 24).

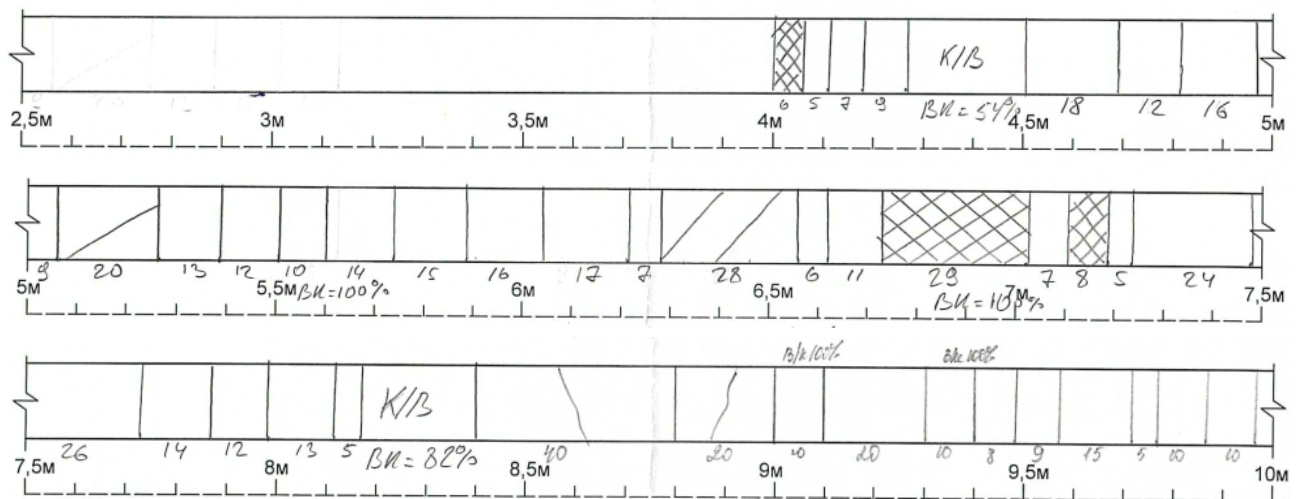


Рисунок 23 — Сопоставление результатов замеров методом ЕЭМИ с результатами дискования керна по скв. с328/лп1

В результате сравнительного анализа материалов прогноза опасности проявления газодинамических явлений при проведении выработок на угольных и рудных месторождениях установлено, что для первых критерием опасности является рост частоты электромагнитных импульсов сравнительно малой энергии (определяемый показателем В прибора ANGEL-M), для вторых — в большей степени рост энергии (в 2 и более раза, определяемый показателем А прибора ANGEL-M) и частоты событий с высокой энергией (рисунок 25).

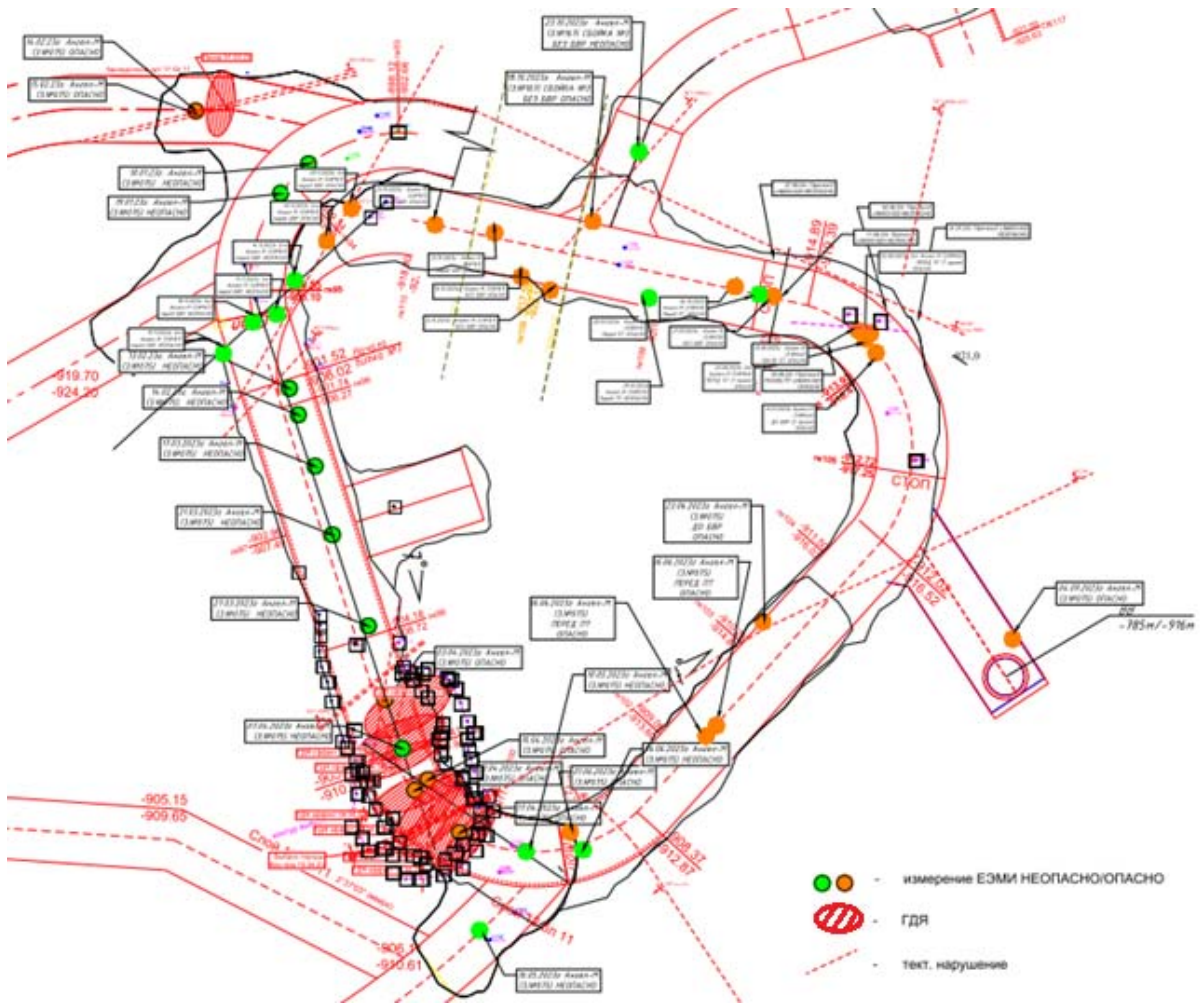


Рисунок 24 — Результаты прогноза выбросоопасности методом зондирования забоя по ЕЭМИ и проявления ГДЯ

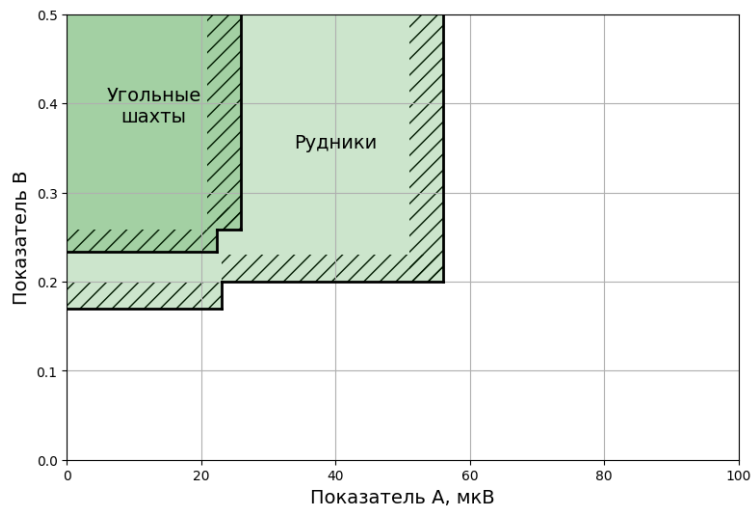


Рисунок 25 — Области пороговых значений показателей выбросоопасности А и В: над штриховкой находятся зоны категории НЕОПАСНО

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научной-квалификационной работой, в которой на основании выполненного автором комплекса исследований решена научная проблема разработки эффективных способов управления состоянием газонасыщенного горного массива при разработке рудных и угольных месторождений, предотвращающих газодинамические явления при проведении выработок и обеспечивающие их устойчивость, что вносит существенный вклад в повышение безопасности работы предприятий минерально-сырьевого комплекса Российской Федерации.

По результатам выполнения диссертационной работы сформулированы следующие выводы и рекомендации:

1. Разработан способ борьбы с выбросами угля и газа на основе поинтервального гидровоздействия на угольный пласт, определены его эффективные параметры и проведены его промышленные испытания в производственных условиях шахт ООО «ММК-Уголь», о чем получен соответствующий акт.

2. Экспериментальные работы и опытно-промышленные испытания поинтервального гидровоздействия в подготовительных забоях выполнены в условиях шахт «Чертинская-Коксовая» (пласты 4 и 5), им. С. Д. Тихова (пласт 23), «Костромовская» (пласты 19 и 26), «Спиридоновская» (пласт Рытвинный). В общей сложности с применением данного способа проведено более 7000 м выработок. Эффективность способа по предотвращению внезапных выбросов угля и газа достигается путем повышения интенсивности дегазации угольных пластов, снижения на порядок получения категории ОПАСНО и объема выполнения мероприятий по предотвращению внезапных выбросов, за счет чего удалось повысить темпы проведения подготовительных выработок с 60–80 м/мес до 100–140 м/мес, а в отдельных случаях до 160 м/мес.

3. Исследования свиты пород рудного тела в условиях рудника «Интернациональный» показали, что выбросоопасными являются доломитовые породы, имеющие среднюю газоносность $0,143 \text{ м}^3/\text{м}^3$ и газопроницаемость, не превышающую 2,11 мД. Появление этих пород в контуре проводимой выработки является прогностическим признаком зон, опасных по ГДЯ в виде выбросов пород и газа, при этом эти явления приурочены к зонам влияния геологических нарушений, где происходит резкая смена параметров напряжений в массиве.

4. Математическое моделирование и шахтные исследования напряженно-деформированного состояния горного массива толбачанской свиты отложений доломитов на руднике «Интернациональный» ПАО «АЛРОСА» позволили

установить, что на участках проявления ГДЯ поле напряжений крайне неоднородное и может меняться от гравитационного до тектонического, при этом выбросы пород и газа приурочены к зонам геологических нарушений с наличием в контуре выработок прослоев тонкозернистых бежевых газонасыщенных доломитов, отличающихся тонкоплитчатой интенсивной трещиноватостью.

5. Разработан порядок расчета параметров передового торпедирования, обеспечивающего формирование за контуром выработки непрерывной зоны наведенной трещиноватости при отсутствии развязывания внезапного выброса, служащего для снятия напряжений, разгрузки коллекторов газа и дегазации массива, а также снижения сейсмического воздействия последующей отбойки пород в забое на ГГМ.

6. Разработан способ борьбы с выбросами пород и газа при проведении прямолинейных горных выработок в ГГМ рудников на основе создания протяженной зоны трещиноватости для заблаговременной разгрузки коллекторов газа и дегазации массива, а также определены эффективные параметры ведения взрывных работ в режиме сотрясательного взрывания.

7. Предложенные в работе способы предотвращения ГДЯ могут применяться как по отдельности, так и в комбинации друг с другом, о чем получено заключение комиссии по проведению опытно-промышленных испытаний комплекса мер по прогнозу и предупреждению ГДЯ на руднике «Интернациональный» Мирнинско-Нюрбинского ГОК АК «АЛРОСА» (ПАО) в протоколе от 7 июня 2022 г. Совместное применение двух способов предупреждения ГДЯ не имеет негативного влияния их друг на друга. Наоборот, если одним из способов не удастся добиться полного приведения забоя выработки в невыбросоопасное состояние, то можно достичь этого дополнительной обработкой массива вторым способом.

8. Разработан метод локального прогноза ГДЯ по естественному электромагнитному излучению, основанный на зависимости параметров естественного электромагнитного излучения, идущего из массива вследствие изменений его напряженно-деформированного состояния в зонах тектонического влияния геологических нарушений, прошедший шахтную апробацию на руднике «Интернациональный».

9. Пороговые значения прогностических параметров (критерии) выбросоопасности устанавливаются при сопоставлении результатов измерения и регистрации параметров ЕЭМИ программно-аппаратным комплексом ANGEL-M с результатами прогноза:

- на угольных месторождениях — по начальной скорости газовыделения, выходу буровой мелочи;
- рудных месторождениях — по дискованию керна, скорости газовыделения, акустической эмиссии.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих статьях:
в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Гречишкин П.В., Феофанов Г.Л., Козлов А.Г., Зайцев Я.И. Анализ параметров деформации вмещающего углепородного массива и выбор крепи выработок по пластам В-12 и В-26 в условиях шахты «Северная» АО «Уралуголь» // Горный журнал. – 2020. – № 1. – С. 73–77.
2. Гречишкин П.В., Щербаков В.Н., Зеляева Е.А., Зайцев Я.И. Оценка эффективности мероприятий по управлению кровлей в конвейерном штреке 555 на шахте «Чертинская-Коксовая» // Горный журнал. – 2022. – № 1. – С. 101–105.
3. Гречишкин П.В., Малова С.А. Природа и механизм выбросов газа и породы // Горный журнал. – 2023. – № 1. – С. 35–40.
4. Ширяев С.Н., Гречишкин П.В., Зыков В.С., Ли К.Х., Харитонов И.И., Лихоузов А.А. Особенности камерно-столбовой отработки склонного к горным ударам пласта К4 в условиях шахты «Денисовская» // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2023. – № 4. – С. 6–12.
5. Гречишкин П.В., Гиниятуллина О.Л., Трошков Н.Ю. Развитие подхода к прогнозу динамических явлений в угольных шахтах с использованием комбинации геофизических и пространственных данных и алгоритмов искусственного интеллекта // Вестник научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2024. – № 1. – С. 10–16.
6. Гречишкин П.В., Гиниятуллина О.Л., Трошков Н.Ю., Панин С.Ф. Комплексный подход к прогнозу динамических явлений в сложных горно-геологических условиях угольных шахт на основе геофизических и спутниковых данных // Горный журнал. – 2024. – № 1. – С. 61–65.
7. Гречишкин П.В. Эффективность применения торпедирования породного массива при проведении горных выработок в выбросоопасных породах // Взрывное дело: научно-технический сборник. – 2024. – № 143/100. – С. 96–109.
8. Гречишкин П.В., Соколов К.В., Трошков Н.Ю. Причины образования и развития структурных дефектов в зонах повышенного горного давления и влияние их на выбросоопасность пласта // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2024. – № 5 (165). – С. 108–114.

9. Гречишкин П.В. Моделирование процесса гидрорасчленения угольного пласта // Горный журнал. – 2024. – № 1. – С. 56–61.

10. Гречишкин П.В., Пуль Э.К. Исследование механизма выбросов породы и газа на рудных месторождениях // Горный журнал. – 2025. – № 1. – С. 28–32.

11. Гречишкин П.В. Определение эффективных и безопасных параметров передового торпедирования для проведения выработок в газонасыщенных горных массивах // Горный журнал. – 2026. – № 1. – С. 33-39.

в международной базе данных Scopus

12. Zamaraev R.Y., Grechishkin P.V., Giniyatullina O.L. Improving the efficiency of forecasting seismic activity during mining of coal reserves in mines using neural network algorithms // Russian Mining Industry.– 2024.– №(3S).– Pp. 57–62.

13. Grechishkin P.V., Sementsov V.V., Troshkov N.Yu., Osminin D.V., Onishchenko S.S. Floor stability in the first layer of mine workings when the stope is run through an impact zone of a geological fault// Russian Mining Industry.– 2024.– №3S.– Pp. 20–25.

в прочих изданиях

14. Гречишкин П.В., Петрова О.А., Трошков Н.Ю., Баширов Ф.Ф. Геомеханический прогноз состояния целиков при подземной разработке мощных угольных пластов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8. – № 2. – С. 41–47.

15. Гречишкин П.В., Петрова О.А., Трошков Н.Ю., Горностаев В.С. Геомеханическое обоснование параметров напряженно-деформированного состояния массива в окрестности полевой наклонной выработки // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2022.– № 8. – С. 94–99.

16. Grechishkin P., Razumov E., Petrova O., Kozlov A., Aushev E Tectonic stress in coal seam v-12, "Severnaya" mine, jsc "Urgalugol" // E3S Web of Conferences. The Second International Innovative Mining Symposium. – 2017.

в нормативных документах

1. Анисимов Ф.А., Гречишкин П.В., Рогачков А.В., Разумов Е.А., Позолотин А.С., Райко Г.В. Комментарии к Инструкции по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах. Часть 1. – Кемерово, 2014. – 252 с.

2. Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах: Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. – Серия 05. Вып. 42. – М., 2015. – 186 с.

3. Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах: Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. – Серия 05. Вып. 42. – М., 2019. – 186 с.

4. Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений: Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. – Серия 05. Вып. 49. – 2-е изд. – М., 2021. – 132 с.

5. Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах: Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. – Серия 05. Вып. 42. – М., 2021. – 182 с.

6. Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений: Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. – Серия 05. Вып. 49. – М., 2023. – 132 с.

Патенты

1. Патент № 146969 Российская Федерация, МПК E 21 D 21/00. Ампула для закрепления анкера в обводненных породах : № 2014122359/03 : заявл. 02.06.2014 : опубл. 20.10.2014, Бюл. № 29 / Анисимов Ф.А., Позолотин А.С., Гречишкин П.В.; заявитель и патентообладатель Анисимов Ф.А. – 2 с. : ил.

2. Патент № 2564508 Российская Федерация, МПК G01C15/04, E21D21/02. Устройство контроля анкерной крепи : № 2014137517/28 : заявл. 16.09.2014 : опубл. 10.10.2015, Бюл. № 28 / Анисимов Ф.А., Позолотин А.С., Гречишкин П.В.; заявитель и патентообладатель Анисимов Ф.А. – 2 с. : ил.

3. Патент № 157641 Российская Федерация, МПК E 21 D 21/00. Подхват : № 2014149161/03 : заявл. 05.12.2014 : опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34 / Анисимов Ф.А., Позолотин А.С., Гречишкин П.В.; заявитель Анисимов Ф.А. – 2 с. : ил.

4. Патент № 157547 Российская Федерация, МПК E 21 D 21/02. Анкер : № 2015100998/03 : заявл. 12.01.2015 : опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34 / Анисимов Ф.А., Позолотин А.С., Гречишкин П.В.; заявитель Анисимов Ф.А. – 2 с. : ил.

5. Патент № 157546 Российская Федерация, МПК E 21 D 21/02. Анкер с трубкой контроля заполнения шпура : № 2015102856/03 : заявл. 28.01.2015 : опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34 / Анисимов Ф.А., Позолотин А.С., Гречишкин П.В.; заявитель Анисимов Ф.А. – 2 с. : ил.

6. Патент № 159580 Российская Федерация, МПК E 21 D 21/00. Нагнетательное устройство анкера : № 2015117973/03 : заявл. 13.05.2015 : опубл. 10.02.2016, Бюл. № 4 / Анисимов Ф.А., Позолотин А.С., Гречишкин П.В.; заявитель Анисимов Ф.А. – 2 с. : ил.

7. Патент № 159581 Российская Федерация, МПК E 21 D 21/00. Анкер с магнетальным устройством : № 2015117976/03 : заявл. 13.05.2015 : опубл. 10.02.2016, Бюл. № 4 / Анисимов Ф.А., Позолотин А.С., Гречишкин П.В.; заявитель Анисимов Ф.А. – 2 с. : ил.

8. Патент № RU 233519 U1 Российская Федерация, МПК E21B43/267. Устройство для гидроразрыва горных пород : № 2025102479 : заявл. 05.02. 2025 : опубл. 23.04.2025 / Гречишкин П.В., Опрук Г.Ю., Гомершмидт К.С. – 12 с.: ил.