

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

На правах рукописи

**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

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва - 2026

## Содержание

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	6
Глава 1. ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ КАК ОБЪЕКТ ОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВЫРАБОТОК НА РУДНЫХ И УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ.....	12
1.1 Общая теория: определение, классификация.....	12
1.2 Горно-геологические факторы и специфика газодинамических явлений в угольных шахтах .....	17
1.3 Природа и механизм внезапных выбросов угля, пород и газа .....	20
1.4 Способы борьбы с выбросами угля и газа.....	32
1.5 Способы борьбы с выбросами породы и газа .....	35
1.6 Методы и средства прогноза выбросоопасности пластов .....	43
1.7 Выводы по главе 1.....	46
Глава 2. ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЫБРОСООПАСНЫЙ УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ С ЦЕЛЬЮ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ.....	49
2.1 Общие вопросы барьерной дегазации угольного пласта.....	49
2.2 Поинтервальный гидроразрыв угольных пластов малой и средней мощности: подход к оптимизации.....	54
2.3 Шахтные испытания метода поинтервального гидровоздействия на выбросоопасный пласт .....	62
2.4 Результаты поинтервального гидроразрыва пласта .....	65
2.5 Контроль эффективности гидроразрыва.....	72
2.6 Результаты экспериментов поинтервального гидровоздействия в конвейерном штреке, путевом уклоне и наклонном вентиляционном стволе .	80
2.7 Оценка экономической эффективности разработанного способа повышения эффективности барьерной дегазации и предотвращения внезапных выбросов угля и газа .....	99

2.8 Выводы по главе 2.....	103
Глава 3. ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ НА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ: ФАКТОРЫ ПРОЯВЛЕНИЯ, АНАЛИЗ СВОЙСТВ ПОРОД ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ГОРНЫХ МАССИВОВ.....	105
3.1 Оценка горно-геологических условий возникновения газодинамических явлений в выработках рудника «Интернациональный» (ПАО «АЛРОСА»)..	105
3.2 Топология и показатели внезапных выбросов .....	113
3.3 Анализ показателей выбросов пород и газа .....	126
3.4 Исследование напряженно-деформированного состояния горного массива в условиях рудника «Интернациональный» .....	133
3.5 Геофизическое исследование НДС горного массива в окрестностях забоев горных выработок в зонах проявления ГДЯ .....	142
3.6 Уточнение границ зоны влияния геологических нарушений в окрестностях автоуклона.....	166
3.7 Измерение смещений и расслоений пород кровли спирального съезда ...	171
3.8 Выводы по главе 3.....	175
Глава 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ГОРНЫХ МАССИВАХ НА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ.....	178
4.1 Оценка полей напряжений в массиве горных пород рудника «Интернациональный» и постановка задачи моделирования .....	178
4.2 Моделирование напряженно-деформированного состояния вмещающего горного массива в условиях рудника «Интернациональный»..	182
4.3 Способы защиты выработок от разрушающего воздействия ГДЯ .....	200
4.4 Выводы по главе 4.....	202
Глава 5. СПОСОБЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ПРОХОДКЕ ВЫРАБОТОК НА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ	

5.1 Проведение горных выработок в ГГМ рудника «Интернациональный» буровзрывным способом .....	204
5.2 Обоснование параметров БВР при проведении прямолинейных участков выработок .....	213
5.3 Обоснование параметров БВР при проведении непрямолинейных выработок .....	229
5.4 Выводы по главе 5.....	240
Глава 6. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МЕР ПО ПРОГНОЗУ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА УГОЛЬНЫХ И РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ.....	242
6.1. Особенности газодинамических явлений на руднике «Интернациональный» и общие подходы к прогнозу ГДЯ.....	242
6.2. Метод прогноза выбросоопасности на угольных месторождениях на основе параметров ЕЭМИ .....	247
6.3. Комплексный подход к прогнозу выбросоопасности на рудниках на основе геофизических измерений .....	263
6.4. Проведение опытно-промышленных испытаний комплексного подхода к прогнозу выбросоопасности в сочетании с БВР .....	273
6.5 Анализ результатов замеров ЕЭМИ на угольных месторождениях и на рудниках .....	283
6.6 Выводы по главе.....	290
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	292
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	295
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	321
Показатели и характеристики зарегистрированных внезапных выбросов за 2013-2023 гг. ....	321
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	323
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....	324
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 .....	325



## **ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АЭ – акустическая эмиссия

БВР – буровзрывные работы

ВВ – взрывчатое вещество

ГГМ – газонасыщенный горный массив

ГГУ – горно-геологические условия

ГДЯ – газодинамические явления

ЕЭМИ – естественное электромагнитное излучение

НДС – напряженно-деформированное состояние

## ВВЕДЕНИЕ

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 с учетом возрастания глубин залегания, высокого содержания газа в породах и пластах угля, а также потребности в увеличении темпов воспроизводства очистного фронта.

В процессе разработки газонасыщенных массивов 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, характерных для угольных и рудных месторождений. Это ограничивает скорость выполнения производственных операций, существенно снижая потенциально возможные объемы добычи при современном технологическом уровне, что негативно сказывается на возможностях дальнейшей механизации и автоматизации работ в горной отрасли.

Вследствие этого, исследование, анализ и обобщение имеющихся данных о ведении 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 лавинообразную деструкцию массива, приводя к внезапному выбросу породы 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» (2015–2026 гг.), «Уголь и майнинг России» (2019–2025 гг.), а также на научных семинарах ВостНИИ и АО КФ «ВНИМИ» (2018–2025 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.

# Глава 1. ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ КАК ОБЪЕКТ ОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВЫРАБОТОК НА РУДНЫХ И УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

## 1.1 Общая теория: определение, классификация

Вопросы предотвращения ГДЯ при проходке выработок на рудных и угольных месторождениях остаются актуальными, несмотря на многолетние исследования в этой области, особенно с увеличением глубин разработки и интенсификацией горных работ. ГДЯ чаще всего приводят к катастрофическим последствиям и несчастным, включая смертельные, случаям, поэтому обеспечение безопасности работающих под землей людей является главной и приоритетной задачей [68, 70, 73]. На рисунке 1.1 приведены данные о смертельных случаях от ГДЯ на шахтах Кузбасса.

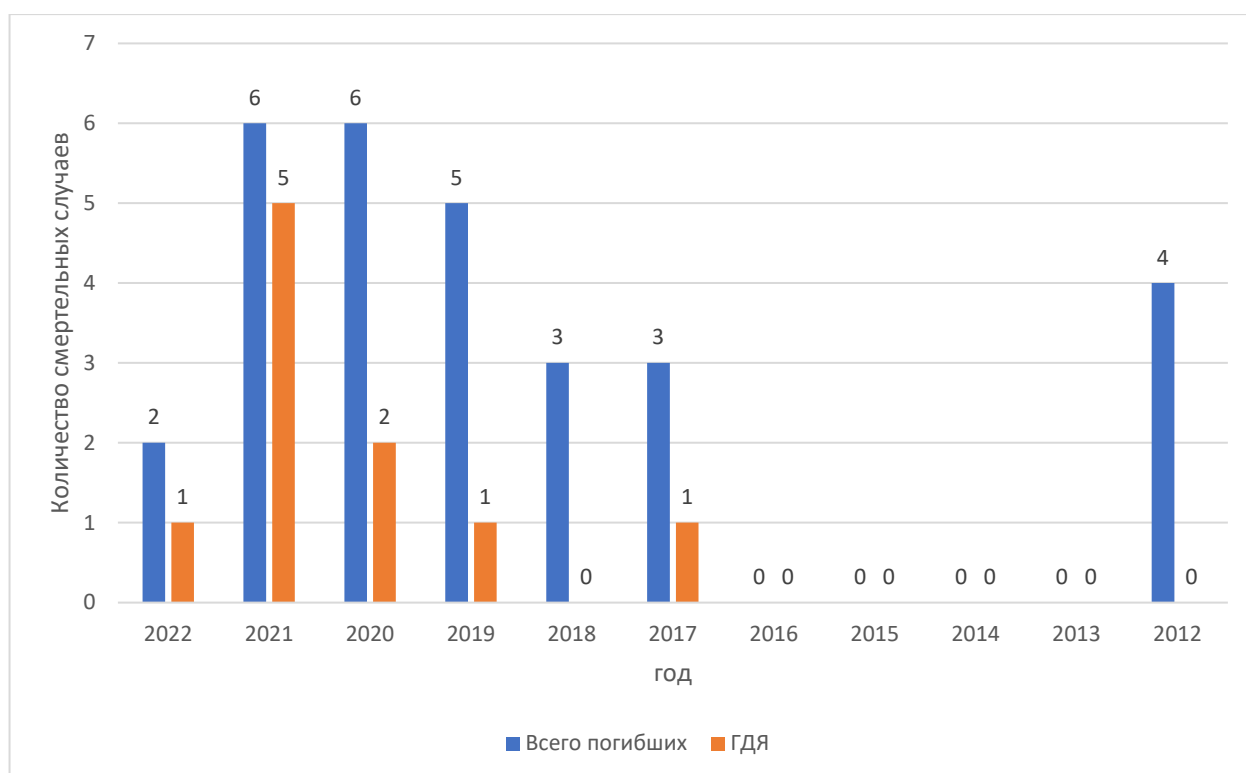


Рисунок 1.1 — Количество смертельных случаев в результате ЧС, связанных с ГДЯ в шахтах Кузбасса



Проявления ГДЯ являются критическим фактором экономических рисков предприятия: аварии наносят прямой финансовый урон, негативно влияя на рентабельность предприятий, что дополняется потерями из-за простоев, вынужденного снижения производительности труда при ведении горных работ [67].

Следует отметить, что проблемой ГДЯ на протяжении многих десятилетий занимаются академические и отраслевые институты, отдельные ученые, среди которых необходимо отметить таких лидеров, как Национальный научный центр горного производства — Институт горного дела им. А. А. Скочинского (ННЦ ГП — ИГД им. А. А. Скочинского), ГБУ «Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности» (МакНИИ), АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» (ВостНИИ, ранее — Восточный научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности»), Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельника РАН (ИПКОН РАН), Московский государственный горный университет (МГГУ), Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН (ИУ ФИЦ УУХ СО РАН) и др.

Разработкой основ фундаментальных научных исследований и их развитием, включая создание современных технологий и технических средств, занимались академики А. А. Скочинский и С. А. Христианович и другие известные учёные — В. И. Белов, М. И. Большинский, Л. Н. Быков, П. В. Егоров, В. Н. Захаров, А. Н. Зорин, В. С. Зыков, Б. М. Иванов, А. М. Карпов, В. И. Клишин, С. В. Кузнецов, Г. Д. Лидин, О. Н. Малинникова, С. В. Мирер, В. И. Мурашев, Р. Я. Мюллер, В. И. Николин, А. Е. Ольховиченко, И. М. Печук, В. С. Попов, В. Н. Пузырев, Г. Н. Фейт, О. И. Хмара, В. В. Ходот, Н. Н. Черницын, О. И. Чернов, А. В. Шадрин и др.

Под газодинамическими явлениями в официальной литературе понимают разрушения массива горных пород при ведении работ в забоях выработок газоносных пластов (пород) под влиянием горного давления, сопровождающиеся кратковременным выделением газа [2, 68, 72, 76, 81, 107, 148, 168, 174, 175]. К таким явлениям относят внезапные выбросы пород и газа, внезапные выбросы угля и газа,

внезапные обрушения (высыпания) угля с попутным газовыделением, внезапные выдавливания угля с повышенным газовыделением. Согласно Методическим указаниям по классификации газодинамических явлений на угольных шахтах [120], ГДЯ характеризуются внезапными быстропротекающими разрушениями угольного пласта (пород) в горных выработках, как правило, сопровождающимися повышенным газовыделением. Согласно данному документу, к ним относятся внезапный выброс угля и газа, внезапный выброс породы и газа, внезапное выдавливание (отжим) угля с попутным газовыделением, горный удар (три вида), толчок, стрельание, внезапное обрушение (высыпание) угля с попутным газовыделением, суфляр, внезапный прорыв газа из зоны геологического нарушения, внезапное разрушение пород почвы с выносом метана и угля [67].

В литературе существует достаточно много расхождений в применении данного термина [54, 65, 78, 99, 106, 110, 137, 155,], однако в контексте диссертационного исследования будем придерживаться следующей трактовки определения, предложенной В. С. Зыковым [64, 65, 67]: **газодинамические явления** – это **быстропротекающее** разрушение массива горных пород и угольных пластов, сопровождающееся выбросом угля, породы и газа с **выделением большого количества газа за короткий промежуток времени**. Они происходят при ведении работ в газоносных угольных пластах и породах, вызывая значительный динамический эффект и представляя собой опасность для горнорабочих.

Международная классификация техногенных геодинамических явлений, разработанная экспертами ЕЭК ООН (Европейской экономической комиссии ООН), базируется на энергетической концепции горных ударов и силовой теории внезапных выбросов, подкрепленных анализом мировой практики предотвращения динамических явлений [66, 68, 70]. На основе данной классификации разработан ГОСТ Р 58150–2018 (рисунок 1.2) [41].

Как видно из рисунка 1.2, к ГДЯ относятся три класса явлений, в которых в качестве упругой энергии, участвующей в формировании явления, выступает газ: «выбросы газа», «выбросы угля (породы) и газа» и «горно-тектонические явления» [67].

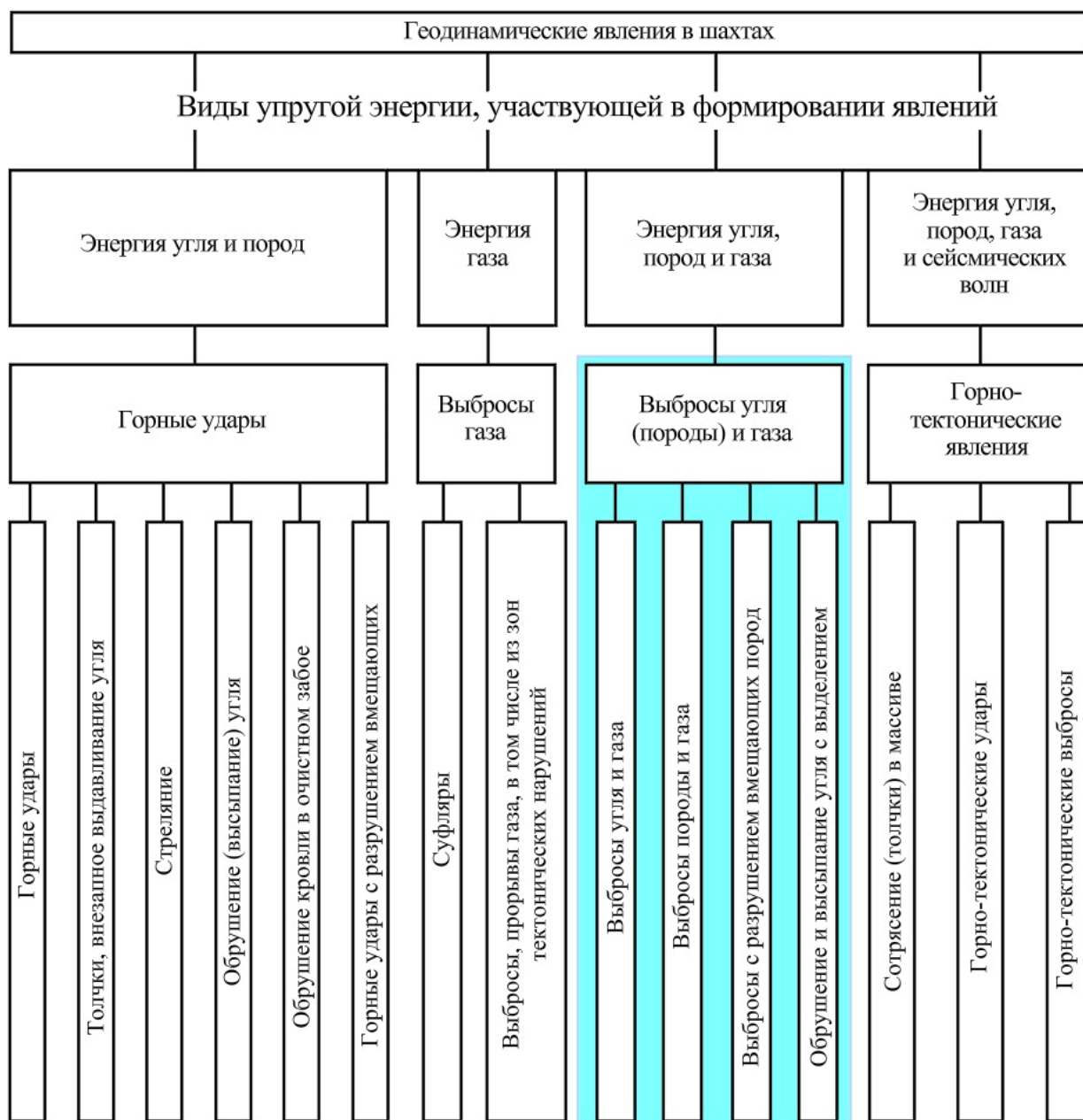


Рисунок 1.2 — Классификация геодинамических явлений [67]

Согласно ГОСТ [41] *выбросы газа* связаны с внезапным выделением газа из зон тектонических нарушений и различных пустот через трещины в скважинах или горные выработки. К *выбросам угля (породы) и газа* отнесены явления, где баланс энергии включает энергию упругого деформирования угля и пород и энергию газа. Подразумевается, что послойное разрушение угля (породы) осуществляется под совместным воздействием горного и газового давлений, а разрушенный материал выносится за счет энергии расширяющегося газа. Горно-тектонические явления

представляют собой симбиоз трех видов энергий, где, кроме указанных выше, присутствует энергия сейсмических волн, выделяющаяся при толчкообразном деформировании горного массива. Включение данной энергии приводит в опасных местах к потере устойчивости горного массива и вызывает проявление горного удара или выброса угля (породы). Следует отметить, что горно-тектонический удар обладает повышенной интенсивностью, в отличие от удара, не инициированного энергией толчка, что проявляется одновременно в ряде горных выработок и даже соседних шахт. Несмотря на то, что характер разрушений выработок (целиков) и поражающего действия такой же, как и при обычном ударе, проявления протекают более интенсивно [41, 67, 68].

Основы классификации ГДЯ, заложенные А. А. Скочинским в 30-х годах XX века, были развиты в трудах В. В. Ходота (1970-е гг.) и полностью пересмотрены и систематизированы в 1991 г. в рамках совместной работы ученых и специалистов крупнейших НИИ (ИГД, ВНИМИ, МакНИИ, ВостНИИ) и надзорных органов, что в свою очередь легло в основу действующих Методических указаний [67, 120].

Действующая в настоящее время классификация используется в качестве базы для расследования инцидентов, идентификацию их типов и обоснования мер по предотвращению ГДЯ. Высокая динамика развития данных явлений, характеризующаяся скоростями перемещения масс в десятки метров в секунду [67], определяет их значительную масштабность и зачастую катастрофический характер последствий.

В монографии И. М. Петухова и А. М. Линькова [152] сформулированы общие характеристики процесса динамического явления:

- Накопление большого запаса потенциальной энергии (упругих деформаций, сжатого газа) в материале с ограниченной способностью к ее необратимому поглощению.
- Подготовительная (первая) стадия процесса – потеря устойчивости состояния равновесия (инициирование, развязывание).
- Вторая стадия — распространение от обнажения вглубь материала волны разрушения.

- Третья стадия — движение материала (и газа) в выработанное пространство.
- Четвертая стадия — остановка волны разрушения и окончание динамического явления [67].

Необходимо учитывать, что процесс газовыделения при ГДЯ зачастую продолжается за пределами четвертой стадии выброса, распространяясь в сопряженные выработки. Согласно исследованиям [68, 145, 152], из-за неравномерного распределения напряжений отдельные участки массива могут быть в разных фазах деформации, что в свою очередь обуславливает параллельное протекание всех стадий процесса [67].

Таким образом, в настоящее время существует достаточно развитая теория и накоплен большой практический опыт определения ГДЯ и выбора мероприятий по предотвращению их в угольных шахтах. Однако до недавнего времени считалось, что рудные месторождения в силу их генезиса в отличие от пластовых месторождений угля не обладают признаками газодинамической опасности. Поэтому в данной классификации не учтены ГДЯ на рудных месторождениях, которые стали активно проявляться в последние десятилетия. В связи с этим ниже в работе рассматривается механизм возникновения ГДЯ на рудных месторождениях, их принципиальные отличия и разрабатывается методика предотвращения их проявлений. В следующем параграфе рассматриваются геологические условия и факторы, определяющие возникновение внезапных выбросов.

## **1.2 Горно-геологические факторы и специфика газодинамических явлений в угольных шахтах**

Генезис внезапных выбросов угля и газа обусловлен многофакторным характером процессов в горном массиве. Они встречаются при разработке пологих, наклонных и крутых пластов в основных угледобывающих бассейнах [61, 69, 74, 93, 116, 126, 140, 146, 148, 151, 200].

Угли выбросоопасных пластов или отдельных пачек обладают повышенной трещиноватостью, перемятостью, рыхлостью, пониженными прочностными свойствами.

Выбросы угля и газа отмечены в угольных пластах, имеющих мощность более 0,2 м. С увеличением мощности пласта (увеличением высоты вскрытия пласта) или мощности их наименее прочных, наиболее нарушенных пачек частота и сила выбросов возрастают.

Выбросоопасные угольные пласты характеризуются повышенной изменчивостью мощности отдельных пачек, прочностных свойств по мощности пласта, простиранию и падению. Они имеют, как правило, сложное строение, включают одну или несколько пачек со следами внутрипластовых подвижек. Их особенностью иногда является гладкая поверхность соприкосновения с вмещающими породами.

Выбросы угля и газа происходят исключительно с выделением метана. Эти выделения в процессе выброса зачастую в несколько раз превышают их природную метаноносность. Установлено, что глубина фиксации первых выбросов составляет от 50 до 350 м ниже границы метановой зоны [126, 147, 151].

Рост метаморфизма и крутизны залегания пластов приводят к сокращению интервала между верхней границей метановых газов и горизонтом появления первых ГДЯ. Угли выбросоопасных пластов или их отдельных пачек имеют повышенные значения показателя начальной скорости газоотдачи, их влажность менее 1,5 %.

Основными компонентами как выбросоопасных, так и невыбросоопасных угольных пластов являются метан (70–96 %), азот (0,5–3,0 %), углекислый газ (0,3–2,0 %), присутствуют тяжелые углеводородные газы ( $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$ ), редкие — гелий, аргон, ксенон. Имеется тенденция увеличения в газах опасных по выбросам пластов содержания тяжелых углеводородных газов, гелия [113].

По данным МакНИИ [159, 181, 134, 136], минимальное давление газа в угольных пластах, при которых происходили ГДЯ, 0,6 МПа. Замерены давления, величина которых достигает 7,3 МПа.

Наименьшая глубина первого появления выбросов в Донбассе равна 120 м, в большинстве случаев она превышает 250 м и зависит от ряда факторов, среди которых существенную роль играют метаморфизм углей и глубина верхней границы зоны метановых газов. С увеличением угла падения и метаморфизма углей глубина первого появления выбросов уменьшается. С ростом глубины разработки угольных пластов возрастает частота проявления и сила внезапных выбросов угля и газа. Отмеченная тенденция снижения частоты и интенсивности выбросов на глубинах свыше 730 м объясняется недостаточной представительностью данных [14, 18].

В ряде работ устанавливается связь между выбросоопасностью угольных пластов и вмещающими их породами. В кровле (почве) большего количества выбросоопасных угольных пластов залегают прочные слои песчаников и крупнозернистых алевролитов [32, 126, 204].

На основе анализа 750 внезапных выбросов угля и газа в Центральном районе Донбасса сделан вывод, что основное количество выбросов отмечено в пределах пологих антиклинальных складок, поперечных к простиранию пород Главной антиклинали [22, 65, 99, 122, 203].

Многолетняя практика разработки выбросоопасных пластов подтвердила, что выбросоопасные зоны совпадают в пространстве с геологическими нарушениями, чаще всего пликативными, в которых одновременно на угольный пласт оказывается наиболее выраженное воздействие давления и сдвига [38, 186]. При этом, как отмечают ряд авторов, структурно-химические особенности угля из выбросоопасных зон отражают состояние механохимической активации углей, обуславливающей интенсификацию различных химических превращений [5, 16, 17, 186, 187].

Таким образом, условия проявления выбросов угля и газа характеризуются сложным комплексом геологических факторов, которые создали высокую нарушенность угольных пластов, обусловившую низкую прочность углей в целом по пласту или отдельных его пачек, благоприятные условия для накопления и сохранения газов в угольных пластах и вмещающих породах под большим давлением, повышенную напряженность горного массива и угольного пласта, образованную естественно-геологическими причинами от внедрения горной выработки [60, 99, 143].

Анализ геологических и тектонических факторов выбросоопасности по угольным пластам шахт приводит к неопровержимому выводу, что наличие вертикальной зональности локальных выбросоопасных зон является результатом тектонических процессов, образовавших сходные условия залегания угольных пластов в пределах отдельных блоков. При этом в пределах одного и того же тектонического блока группа смежных пластов испытывала одни и те же виды тектонического воздействия, которые чаще всего приводили к подвижкам и смещениям преимущественно в плоскости пластов — наиболее пластичных и податливых слоях в геологическом разрезе. Очевидно, ширина зон тектонической препарации угольных пластов захватывала большую часть отдельных тектонических блоков, что подтверждается наличием в горных выработках препарированных отдельных пачек или всего пласта в целом (раздувы, пережимы, раздробленность) и большого числа мелких разрывных нарушений [22, 91, 101, 104, 131, 143, 198].

### **1.3 Природа и механизм внезапных выбросов угля, пород и газа**

Для объяснения сложного явления внезапных выбросов угля и газа предложены многочисленные гипотезы. В одних гипотезах основная роль отведена газу, в других — давлению горных пород или напряжениям тектонического происхождения в возбуждении и их развитии.

В соответствии с концепцией академика М. А. Садовского, горный массив обладает такими фундаментальными характеристиками, как дискретность, структурная неоднородность, непрерывное деформирование и стабильный приток механической энергии [170].

В работе [183] рассматривается волнообразное чередование геологических и тектонических структур: в литосфере чередуются положительные и отрицательные структуры разных порядков, таким образом, их распределение подчиняется знакопеременному закону.

Универсальность данного свойства литосферы проявляется от глобального до локального уровня, а также в структурах разного возраста (от древнейших до



современных) [166]. Изменения геологических и геофизических характеристик литосферы вызывают миграции геодинамических процессов, которые происходят на поверхности Земли и в ее недрах. В рамках волновой концепции строения и развития литосферы Земли объясняются волнообразный характер тектонических структур литосферы, циклический характер и миграция геологических процессов во времени и пространстве, т. е. периодическое изменение ее напряженного состояния.

Таким образом, роль геодинамических, геологических и тектонических процессов на региональном уровне сводится к перераспределению энергии в горном массиве. Их совместное воздействие приводит к усилению неоднородности, изменчивости свойств горного массива: усиливается неравномерность в распределении структурно-химических, физико-механических, газокинетических свойств углепородного массива, а также его напряженно-деформированного состояния как по площадям, так и по глубине [166].

В явлении выброса выделяют две стадии: разрушение угля и выделение метана и собственно газодинамическая.

Газодинамическая стадия выброса, как явление, является наиболее изученной: расширение метаноугольной смеси, состоящей из частиц разрушенного угля и свободного газа высокого давления  $\approx 40\text{--}60$  атм. Таким образом возникает собственно волна выброса, которая двигается вглубь пласта со скоростью  $\approx 30\text{--}40$  м/с, и ударная воздушная волна достаточно слабой интенсивности в забое. Фундаментальные основы и математическое обоснование данной стадии представлено еще в работах С. А. Христиановича [193–196]. Однако до их пор остаются вопросы с описанием процесса первой стадии явления выброса, когда происходит разрушение угля на мелкие фракции (так называемая «бешеная мука») и выделение метана из связанного (сорбированного/растворенного) состояния в свободное. При этом может фиксироваться выход дополнительных порций газа, целиком зависящих от процесса разрушения, его характера протекания. При этом в угле должно содержаться количество метана  $\approx 20\text{--}40$  см<sup>3</sup>/г, способного к быстрому выделению при изменении физических условий вблизи границы забоя [26, 64, 94].

В. В. Ходот разделил динамические явления по роли основного вызывающего их фактора на три группы: в первой группе эта роль отведена заключенному в угле газу, во второй — давлению горных пород, в третьей — обоим факторам [166, 189, 191]. Все три свойства угольного пласта тесно взаимосвязаны. При росте НДС на конкретном участке пласта снижается его газопроницаемость, растут давление газа, энергия газа и энергия угля. Рост давления газа увеличивает склонность угольного вещества к дробимости, что, в свою очередь, снижает прочность угля. Гипотеза В. В. Ходота является наиболее распространенной на современном этапе исследования природы выбросоопасности угольных пластов [166]. Следует добавить, что существуют и геохимические гипотезы [13, 28, 77, 147, 166].

Не останавливаясь на детальном анализе всех или большинства существующих гипотез и предположений, кратко рассмотрим те из них, которые теоретически и экспериментально наиболее обоснованы в нашей стране и получили наибольшую популярность.

Гипотеза свободного газа Л. Н. Быкова [29] как основного фактора, развязывающего внезапный выброс, является исторически первой и наиболее развитой в нашей стране. Ее основы заложены еще работами Н. Н. Черницына [197].

По представлениям Л. Н. Быкова, газ, образовавшийся в угольных пластах, распределяется неравномерно, одна его часть сорбируется углем, другая — остается в свободном состоянии. Сорбированный газ распределен закономерно по мощности пласта, а по простиранию газоносность может оставаться на одном уровне или изменяться. Такой переход происходит плавно вследствие увеличения доли свободного газа в участках пластов при наличии в них специфической (ячеистой) структуры, вызванной тектоническими процессами, а также вследствие образования систем трещин, похожих на сплюснутые пчелиные соты.

Выбросы происходят в «мягких» углях, которые при удалении газа «крепчают» — становятся более крепкими. При подходе забоя к такому очагу выброса угля и газа полоса угля, разделяющая забой, прорывается газом, происходит внезапный выброс. Его интенсивность (сила) зависит при прочих равных условиях от размеров очага выброса и от того, как подходит забой к очагу: при подходе выработки

перпендикулярно к системе трещин (забой располагается по кливажу) выход газа затруднен, уголь отрывается легче и происходит внезапный выброс больших размеров. При параллельном расположении забоя к кливажу выход газа облегчается, а уголь имеет большое сопротивление разрыву [30].

Теория Л. Н. Быкова является дальнейшим развитием представлений теории Арнольда [15] и отличается от последней тем, что в ней вместо наличия небольших «гнезд» газа, окруженных крепким, слабопроницаемым углем, предполагается наличие зон с видоизмененной структурой угля. Возможность образования последних допускается в процессе ведения горных и взрывных работ.

Таким образом, гипотеза внезапных выбросов угля и газа Л. Н. Быкова качественно учитывала взаимодействие газа, структуры угля, давления горных пород и технологических факторов, объясняла установленную неравномерность распределения выбросов по длине выработки и выделения в ряде случаев метана, количество которого значительно превосходило его природное содержание, рост силы выбросов в Центральном районе с увеличением газоносности угольных пластов (метаморфизма углей). Эту гипотезу поддержали некоторые зарубежные ученые, установившие закономерное увеличение силы и частоты выбросов угля с приближением участков разработки к источникам углекислоты [215, 221].

Однако эта теория не объясняла, почему количество внезапных выбросов в подготовительных выработках примерно такое же, как и в очистных, хотя длина забоев в них примерно в 5 раз меньше, чем в последних. Кроме того, она не объясняла, почему при вскрытии угольных пластов если на меньшей глубине был выброс, то при большей глубине его вскрытия практически всегда происходит выброс. Главный недостаток гипотезы Л. Н. Быкова заключается в том, что предложенный на ее основе способ борьбы с внезапными выбросами угля и газа — пересечение очагов буровыми скважинами — является недостаточно эффективным.

Из других газовых гипотез следует отметить предположения о возникновении внезапных выбросов вследствие высокого давления газа, превосходящего временное сопротивление угля отрыву в зонах пониженной прочности [61, 144, 214]; неоднородности структуры пор угля [226]; образования очагов внезапных выбросов в

результате взрывных работ [218, 23, 106]; возможности увеличения давления газа в порах угля в результате падения сорбционного потенциала в ультрапорах [24, 163].

Г. Д. Лидин [110–112] рассматривает сжатый газ в угольных пластах как основной источник энергии внезапных выбросов. При этом проявление энергии сжатого газа в виде внезапного выброса угля и газа он считает возможным в тех случаях, когда статический или динамический напор газа превосходит механическую прочность угля в пласте. По его мнению, это может произойти в трех случаях: 1) при снижении механической прочности угля в пласте в направлении ведения выработки; 2) при повышении газопроницаемости угольного пласта в направлении подвигания забоя выработки; 3) при увеличении скорости продвижения поверхности обнажения угля. Однако, как он полагает, наиболее часто выбросы обуславливаются совокупностью перечисленных факторов.

Ряд исследователей, не отрицая влияния газа на выброс углей, считают, что основной причиной внезапных выбросов угля и газа является давление горных пород и накопленная в них потенциальная и кинетическая энергия [209, 95, 96, 127, 135, 141, 142, 143, 184].

Наиболее полно гипотеза освобождения потенциальной энергии горных пород, сохранившейся в результате тектонических процессов, разработана И. М. Печуком [153–156]. По его представлениям, при приближении горной выработки к участку, где имеется мощный пласт упругих пород (песчаника), изогнутый в складку, последний распрямляется подобно пружине, разрушает и дробит уголь, который выносится вибрирующей породой и усиленно выделяющимся газом. Г. А. Коньков и его последователи рассматривают выброс как проявление потенциальной и кинетической энергии горных пород современных тектонических процессов [97]. По их мнению, газодинамические зоны — это участки наиболее контрастных современных движений различного знака. Следует отметить, что внезапные выбросы угля и газа происходят в самых различных условиях, в том числе тогда, когда в кровле и почве нет мощных упругих боковых пород (песчаника). По данным В. В. Ходота и др., не было замечено в Донбассе и на шахтах Кузбасса каких-либо существенных различий между составом и свойствами пород, вмещающих пласты, опасные и не опасные по ГДЯ.

Получили широкое распространение разного рода гипотезы концентрации напряжений в призабойной зоне угольного пласта, среди которых в нашей стране наибольшее развитие получили представления А. М. Карпова [91], В. И. Белова, за рубежом — Жарлье и др. [33]. В этих гипотезах горный удар («удар кровли»), в сущности, признается первопричиной внезапных выбросов: в зонах повышенного давления, образующегося впереди забоя очистной выработки, могут возникать дополнительные напряжения при зависании упругой и мощной кровли, в результате чего происходит волнообразное движение кровли, разрушающее уголь. При внезапном опускании кровли накопленная потенциальная энергия превращается в кинетическую, дополнительная нагрузка вызывает выброс угля, который сопровождается усиленным выделением из него газа.

Этими гипотезами трудно объяснить выбросы, происходящие при бурении скважин по пласту, прохождении штреков и гезенков, при вскрытии пластов. В этих случаях маловероятны удары кровли, как и выпрямление упругих боковых пород, ввиду небольших размеров выработок. В. И. Белов дополнил представления А. М. Карпова предположением о возможности образования метана вследствие термодинамических процессов — перехода при опускании кровли кинетической энергии в тепловую, в результате которого происходит сухая перегонка угля.

Развивая общие представления А. А. Скочинского [174], В. В. Ходот и его сотрудники выполнили обширный комплекс теоретических и экспериментальных работ по исследованию свойств углей, определяющих их опасность по выбросам, напряженного состояния угольного пласта и характера его изменения в окрестности горной выработки, а также по моделированию внезапных выбросов угля и газа, позволивший разработать так называемую энергетическую теорию внезапных выбросов угля и газа. Характерной чертой, отличающей ее от ряда других гипотез и теорий, является подкрепление положений лабораторными экспериментами, данными шахтных наблюдений и развитых на базе механики деформируемых сред и газовой динамики решений частных задач.

Процесс разрушения угля и отброса его газом распространяется вглубь массива, в направлении концентрации напряжений и повышения давления газа. Препятствия на

пути отброса угля (узкая горловина каверны, малое сечение выработки, загромождение ее оборудованием) вызывают самоподбучивание, тормозящее процесс и обуславливающее его затухание.

Таким образом, по В. В. Ходоту, инициация и динамика выброса определяются следующими факторами:

1. высвобождаемая при вскрытии пласта потенциальная энергия угля (а иногда и вмещающих пород) должна быть достаточной для его декструкции и разрушения связей с массивом;
2. скорость разрушения угля должна превышать темпы дегазации образовавшихся пустот;
3. градиент давления газа должен значительно превышать сопротивление угольной массы ее выбросу в выработку [190].

Теория внезапных выбросов угля и газа, разработанная В. В. Ходотом, большое количество данных лабораторных и шахтных экспериментов, развернувшихся по поводу этой теории дискуссий послужили мощным толчком к всестороннему комплексному исследованию газодинамических явлений, обоснованию и разработке ряда способов борьбы и методов прогноза выбросов угля и газа [189]. То же можно сказать и о предположениях Р. Я. Мюллера и В. С. Попова [128], которые рассматривают выбросы угля и газа как взрывоподобные химические превращения в виде цепного процесса с быстрым выделением  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  на метастабильных участках, образовавшихся в результате метаморфизма углей. Не отрицая роли нарушенности угольных пластов в проявлении внезапных выбросов угля и газа, необходимо отметить, что причина ее образования заключается не в возникновении «раздувов» вследствие течения вещества песчаников, а в более сложных процессах неравномерного уплотнения пород угленосной толщи и в проявлении тектонических сил.

Таким образом, следует констатировать, что до последнего времени нет общепринятой точки зрения по вопросу о природе и фундаментальных механизмах возникновения внезапных выбросов угля и газа.

Представляется, что внезапные выбросы угля и газа [59] являются результатом сложного взаимодействия ряда природных факторов (физико-механических свойств,

наличия газа, напряженного состояния и веса угля) при внедрении выработки в горный массив, что совпадает с мнением других исследователей [69].

В процессе выемки угля происходит резкая трансформация газонапряженного состояния призабойной зоны при переходе линии забоя из положения 1 в положение 2 (рисунок 1.3).

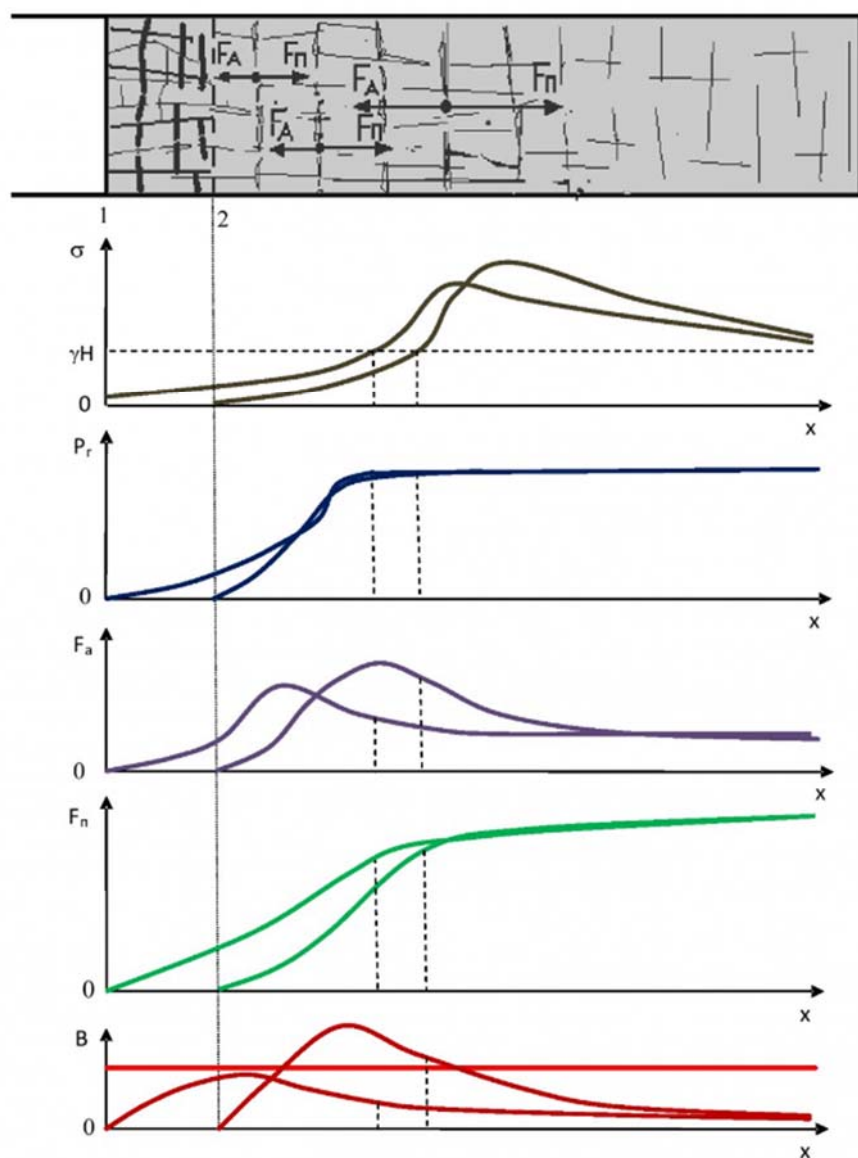


Рисунок 1.3 — Изменение НДС пласта в зоне влияния выработки перед внезапным выбросом угля и газа [69]

Рост напряжения на кромке пласта провоцирует его интенсивную деструкцию до момента стабилизации системы в равновесное состояние на уровень несущей

способности частично разрушенного массива. Как отмечалось выше, деформационные процессы протекают практически мгновенно и эпюра напряжений смещается синхронно с подвиганием забоя, в то время как падение давления газа происходит с существенным опозданием из-за инертности процесса дегазации. В результате в призабойной части формируется критический градиент давления. Это создает избыточную потенциальную энергию, реализующуюся в форме выброса угля в выработку [69].

Смещение угольной призмы, ограниченной забоем и инициирующей системой трещин (с пиковым значением коэффициента  $F_a/F_n$ ), провоцирует декструкцию краевой части пласта, что сопровождается интенсификацией десорбции газа вследствие динамического разрушения угля [69].

Вторая стадия механизма выброса описывается уравнением  $\frac{F_{ax}}{F_{nx}} \geq 1$ , где  $x$  — расстояние от обнажения массива,  $F_a$  — активная сила,  $F_n$  — пассивная сила.

Внезапные выбросы породы и газа инициируются динамическими нагрузками от взрывных работ, где взрывной импульс создает динамические нагрузки к статическим напряжениям и приводит к мгновенному отрыву слоя породы от массива. Процесс приводит к деформациям пород и перераспределению напряжений вокруг выработки. Контур выработки начинает перемещаться после отрыва породы под воздействием импульса и сил упругого восстановления. Непосредственно у вновь образованного забоя появляется зона растягивающих напряжений, за которой следует зона сжатия. Превышение прочности породы на разрыв или сжатие создает условия для внезапного разрушения — выброса, которое происходит под совместным действием нормальных и касательных напряжений и давления сжатого газа.

Если рассмотреть месторождения солей, то можно выделить такие ГДЯ, как: внезапные выбросы соли и газа, обрушение пород кровли, сопровождающиеся газовыделениями, явления комбинированного типа [7–9, 78, 114, 132, 133].

География выбросов калийных солей и газа охватывает разработки карналитовых и сильвинитовых пластов Верхнекамского месторождения (Россия) [132, 133], Старобинского месторождения (Белоруссия), а также месторождений в



Германии, Польше и Франции [216–217, 25], при этом минимальная глубина возникновения проявления составляла 265 м. На рисунке 1.4 представлены характерные полости выбросов на калийных пластах различной формы (конусообразной, грушевидной и т. п.).

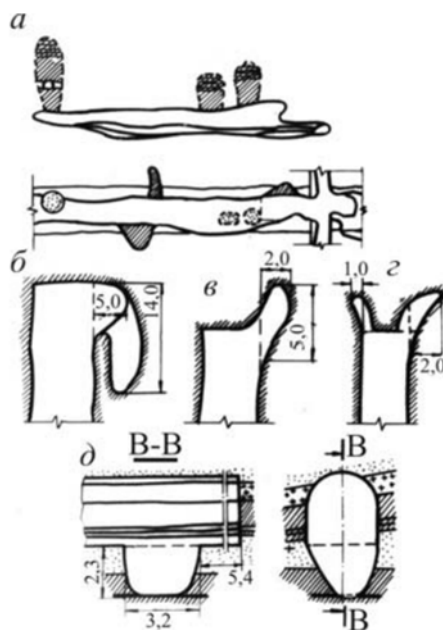


Рисунок 1.4 — Характерные полости внезапных выбросов карналитовых пород и газа при отработке выбросоопасного пласта на Верхнекамских рудниках (б, в, г) и их расположение относительно очистных камер (а) [148]

Природа выбросов соли и газа, как правило, обусловлена наличием локальных газонасыщенных зон, формирование которых происходило при эпигенетических (вторичных) процессах, обусловленных складкообразованием и миграцией газонасыщенных водных растворов, которая сопровождалась аккумуляцией газов на локальных участках пород с пониженной прочностью, т. е. в зонах геологических нарушений [11]. Выбросы соли и газа происходят с выделением таких природных газов, как: метан, углекислый газ, азот и водород [25].

Механизм протекания на первой стадии явления выброса соли и газа характеризуется разрушением пород кровли под действием скоплений свободных газов на контактах геологических разностей вплоть до кровли каменной соли. На второй стадии происходит выброс пород пласта под воздействием очагового скопления, и

завершается все разрушением пласта каменной соли под воздействием приконтактных скоплений [41, 89, 115, 121]. Соль при выбросах разрушается до мелких фракций, частично до пыли.

Традиционно выделение природного газа считается неотъемлемым фактором разработки угольных и соляных месторождений. На рудниках ГДЯ до недавнего времени классифицировались как редкие и локальные. В своих трудах академик А. А. Сkochинский [174] указывал на наличие газов на железных, апатитовых, полиметаллически и золоторудных месторождениях, но специфика их проявлений в этих условиях была не систематизирована. Отсутствие научно обоснованной базы по интенсивности газопроявлений в условиях рудных месторождений препятствовало своевременной разработке эффективных методов защиты [117].

В настоящее время присутствие горючих газов и  $\text{CO}_2$  фиксируется не только на угольных бассейнах. География газопроявлений на месторождениях твердых полезных ископаемых становится все более разнообразной, особенно при переходе к отработке глубоких горизонтов классически «спокойных в газовом аспекте» объектов. В России выделения метана зафиксированы на рудниках Норильска, Северного Кавказа (в частности, Урупского), Магаданской области, а также на апатитовых объектах Хибин и алмазных месторождениях Якутии. Мировая практика подтверждает наличие ГДЯ на железорудных (Украина), золоторудных (Казахстан, ЮАР), серных и урановых (Узбекистан), а также полиметаллических (Канада) предприятиях. Кроме того, на ряде объектов, таких как рудники Забайкалья (Балей, Тасеево), Кривбасса и месторождение Харфита (Румыния), отмечены значительные притоки углекислого газа [145].

Необходимо подчеркнуть, что природные газы рудных объектов имеют более сложный состав, чем у пластовых месторождений. Полигенная природа их основных компонентов обусловлена метаморфизмом органического вещества в различных термодинамических режимах, которые сопровождали процессы формирования и генезиса рудных тел.

Для рудных месторождений характерна высокая пространственная неоднородность распределения газов. Как правило, формирование очагов вызвано их привязкой у конкретным генерирующим и консервирующим структурам. При этом

формирование газовой зональности напрямую зависит от пространственной конфигурации газоносных пластов, непроницаемых экранов, зон естественной деградации и геометризации самих рудных месторождений.

Когда мы рассматриваем рудные месторождения, то механизм ГДЯ выброса породы и газа немного отличается от аналогичного на угле. Так, например, на динамические явления на руднике «Интернациональный» характеризуются рядом отличительных признаков, выделяющих их из общей классификации ГДЯ, представленной выше [68, 75, 116, 150, 199]: выбросы происходят в доломитах без насыщения газом из смежных пород (в отличие от условий Донбасса) [25, 37]; прочность пород в очагах выбросов иногда превышает прочность вмещающего массива, а сами явления происходят без фиксации предупредительных признаков; в химическом составе газа, согласно исследованиям Горного института Пермского ФИЦ УРО РАН, присутствует метан (до 84,5 %) и водород (до 10,5%) (так называемый «гремячий газ») [75].

По мнению некоторых исследователей, механизм ГДЯ в доломитах обладает следующей специфической чертой: при высокой прочности пласта развитие процесса инициируется хрупким разрушением (микроударом) на контуре выработки. Данный импульс запускает последовательное послойное отделение породы от массива под воздействием газового давления с последующим ее отторжением в выработку [75].

Таким образом, выбросы угля, пород, солей и газа являются результатом сложного многофакторного взаимодействия ряда природных компонентов и их состояний при отработке горного массива. Однако роль каждого из этих факторов, причины возникновения такого взаимодействия в каждом конкретном случае разные. Из изложенного следует важный вывод, что ни одна из существующих теорий и гипотез не описывает многообразные процессы газодинамических явлений в угольных шахтах и рудниках, формы проявления которых были рассмотрены в предыдущей главе. В лучшем случае они объясняют природу и механизм отдельных форм проявления выбросов, т. е. отдельные явления, но не их совокупность.

## 1.4 Способы борьбы с выбросами угля и газа

При разработке локальных и региональных мероприятий для предотвращения выбросов исследователями принимается одна из моделей выбросов. Обычно изменяется один или несколько факторов, влияющих на развязывание и протекание динамических явлений: напряженное состояние массива, физико-механические свойства угля и пород, давление газа и технологический процесс отбойки породы, угля.

Для изменения физико-механических свойств выбросоопасной среды в сторону увеличения пластичности и вязкости применяются увлажнение массива, его охлаждение, обработка призабойной части растворами поверхностно-активных веществ, вибрационное сейсмоакустическое воздействие и пр. Следует отметить, что указанные методы способствуют также разгрузке массива [4, 20, 21, 131, 137, 164].

Уменьшение напряженного состояния, его выравнивание и разгрузка массива в забое, а также прилегающей к забою части выработки осуществляются путем торпедирования, проходки выработок уменьшенного сечения с последующим расширением до проектного контура, образования опережающих разгружающих щелей. Наиболее эффективным способом является щелевая разгрузка, однако трудоемкость образования щели и отсутствие необходимого оборудования с достаточной производительностью ограничивают применение этого метода борьбы с выбросами. В смешанных забоях при крепости пород до  $f = 6 \div 8$  широко применяется разгрузка пласта полостями (селективная выемка) [227, 74, 78–80, 92, 108, 172, 199].

Изменение газового фактора производится снижением давления газа, дегазацией массива, переводом в твердое состояние или нейтрализацией.

Опережающие скважины применяются по выбросоопасному угольному пласту для его дегазации как эффективное мероприятие, снижающее выбросоопасность угля. Однако эксперименты, проведенные для выбросоопасного породного массива, показали невозможность использования этого способа для борьбы с выбросами породы и газа. Это связано с низкой (практически равной нулю) проницаемостью

неразгруженных выбросоопасных пород. Кроме того, установлено, что скорость газовыделения достигает максимума через 50–100 сут. после бурения скважин [36].

Для локализации выброса в некоторых случаях применяются заградительные перемычки с целью ограничить распространение выброса породы и газа за проектный контур выработки. Случайный характер условий возникновения выброса, отсутствие метода его точного прогноза, а также интенсивность протекания явления не позволяют определить параметры способа и приводят к отрицательным результатам. В связи с этим метод нейтрализации освобождаемой потенциальной энергии породного массива заградительными перемычками не находит широкого применения [58, 81].

Использование защитных пластов не позволяет существенно изменять определяющие выбросоопасность механические свойства пласта — упругость и прочность, но уменьшает динамические проявления за счет снижения горного давления на отдельные участки защищаемого пласта. К тому же управление горным давлением достигается мерами, позволяющими избегать излишней концентрации напряжений. В результате разгрузки защищаемого участка пласта в нем уменьшаются величины действующих напряжений и снижается давление газа, т. е. изменяются накопленная потенциальная энергия и возможные условия перехода ее в кинетическую энергию перемещения.

В зависимости от свойств угольных пластов определяющие условия возникновения явления и основные действующие силы могут существенно различаться, а следовательно, в определенной мере должны различаться и основные способы предотвращения этих явлений [74, 165, 200].

Большинство региональных способов предотвращения выбросов направлено на заблаговременное снижение горного давления и давления газа в массиве, а также на пластификацию угля и увеличение вязкости его разрушения. Локальные способы предотвращения выбросов основаны преимущественно на рыхлении и разгрузке от напряжений призабойной зоны пласта, приводящей к созданию впереди забоя безопасной зоны, разгруженной от напряжений и дегазированной.

Условия применения способов предотвращения газодинамических явлений в первую очередь определяются физико-механическими свойствами угольных пластов,

а также выдержанностью этих свойств и частотой выбросоопасных зон. Это обстоятельство делает особенно актуальной разработку комплекта шахтных приборов, пригодных для обеспечения требуемой надежной информации. Следует отметить, что предотвращение внезапных выбросов наиболее эффективно при применении комплекса мер предотвращения выбросов, включая правильно выбранные способы управления горным давлением и технологию ведения горных работ.

На угольных шахтах Кузбасса темпы проведения выработок по выбросоопасным пластам не превышают 60–80 м/мес. Данная ситуация обусловлена высокой трудоемкостью мероприятий по предотвращению ГДЯ. В таблице 1.1 систематизированы локальные способы предотвращения внезапных выбросов угля и газа.

Таблица 1.1 — Локальные способы предотвращения выбросов угля и газа [228]

Название способа	Особенности
Бурение опережающих скважин	Макс. скорость бурения 0,5 м/мин, число скважин и схемы их расположения устанавливаются таким образом, чтобы обеспечить разгрузку и дегазацию пласта в сечении выработки и за ее контуром на 4 м
Гидроотжим призабойной части	Шпуров должны быть пробурены в пачке пласта, в которой достигается их качественная герметизация. Концы шпуров должны выходить на 0,5 м за контур выработки. Работы по выемке угля допускаются не раньше, чем через 30 мин. после завершения гидроотжима
Гидрорыхление пласта	На пластах, представленных несколькими пачками угля, скважины следует бурить по наиболее крепкой пачке. При наличии прослоев породы, разделяющих пласт на две угольные пачки, скважины следует бурить по наиболее мощной или по обеим пачкам. В случае преждевременного прорыва воды из нагнетательной скважины на забой по трещинам необходимо провести повторное нагнетание через скважину, пробуренную на расстоянии 2 м от первой
Низконапорное увлажнение	Радиус увлажнения $R_{ув}$ для одиночной скважины определяется с таким расчетом, чтобы расстояние от стенок выработки до границы увлажненной зоны составляло не менее 5 м

Краткая характеристика трудоемкости выполнения мероприятий:

1. *Бурение опережающих скважин* - удельное время мероприятий на проведение 1 п. м выработки составляет 3 часа. Эффективное наложение зон их

слияния — около 4 м, что приводит к необходимости повторения цикла разгрузки через 4 метра с подвигания.

2. *Гидровоздействие* на угольный пласт и *торпедирование* угольного массива выполняются за ремонтную смену, поэтому удельное время мероприятий 1,5–2 ч / п. м.

3. *Низконапорное увлажнение* имеет преимущество перед указанными выше способами, т. к. выполняется через длинные скважины и, несмотря на длительное время нагнетания, удельное время мероприятий составляет 0,6–0,7 ч / п. м.

Исходя из указанных выше преимуществ и недостатков существующих способов управления газодинамическим состоянием массива, предложена идея использовать принцип создания протяженной защищенной зоны по трассе выработки, но с интенсивной трещиноватостью, эффективной работой дегазации и в более короткие сроки, чтобы минимизировать удельную трудоемкость мероприятий по предотвращению внезапных выбросов угля и газа.

### **1.5 Способы борьбы с выбросами породы и газа**

Как упоминалось выше, проблему выброса породы и газа на рудных месторождениях сформулировал в своих трудах академик А. А. Скочинский, но в силу единичности случаев таких проявлений ГДЯ и ограниченного количества данных разработка способов борьбы с подобными явлениями начата сравнительно недавно и в ее основу легли подходы для предупреждения проявлений ГДЯ на выбросоопасных слоях угля и песчаника.

Выбросоопасные породы неоднородны в слоях одной толщи как по мощности, так и по простиранию. Отдельные пережимы, раздувы и нарушения приводят к сложному напряженному состоянию в призабойной зоне.

Одним из самых распространенных методов вскрытия газообильных пород, который пришел напрямую из разработки газоносных пластов угля и песчаника, является буровзрывной способ проведения горных выработок.

Ниже приведем кратко описание технологии, которая успешно применялась на выбросоопасных слоях песчаника на глубоких горизонтах шахт Донбасса. Перед началом работ в забое делением керна на диски прогнозируется степень выбросоопасности пород. Если плоскость забоя полностью проходит в слое однородного песчаника, то бурят одну скважину диаметром 59–76 мм по оси выработки. При наличии в плоскости забоя неоднородных слоев пород необходимо бурить три разведочные скважины (рисунок 1.5), что позволяет дать более точную оценку расположения выбросоопасных слоев песчаника на некотором расстоянии по ходу выработки и за ее пределами.

Взрывные работы выполняются в два приема: во время первого взрывают врубовые и вспомогательные шпуров, второго — оконтуривающие [58]. Число и расположение оконтуривающих шпуров определяется с учетом напряженно-деформированного состояния массива согласно аналитическим расчетам, а также формы и размеров оставшегося целика в сечении выработки.

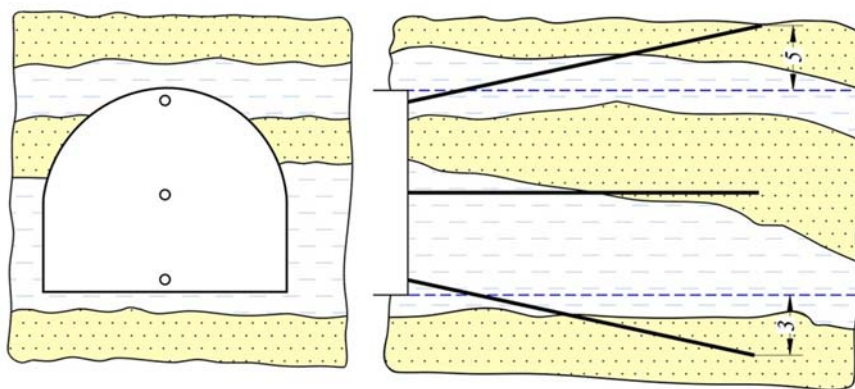


Рисунок 1.5 — Схема бурения разведочных скважин

Для предотвращения внезапных выбросов пород и газа на шахтах Донбасса накоплен положительный опыт применения следующих технологий:

- образование сплошной разгрузочной щели по периметру выработки с последующей взрывной отбойкой;
- с опережающим забоем малого сечения и последующим расширением выработки до проектного сечения.



Первый способ предусматривает следующие мероприятия:

- образование сплошной разгрузочной щели по периметру выработки;
- заградительные перемычки в комплексе со специальными параметрами буровзрывных работ;
- канатные заградительные перемычки.

*Образование сплошной разгрузочной щели по периметру выработки* обеспечивает снижение напряженного состояния пород за счет их дегазации и создает препятствие распространению ударной волны вглубь породного массива при взрывании забоя, что позволяет исключить возможность возникновения выброса породы из-за проектного контура сечения выработки (рисунок 1.6). Щель создает гладкое оконтуривание породы в кровле и боках выработки, что способствует повышению устойчивости породного обнажения.

В пределах оконтуренного щелью проектного сечения выработки разрушение породы производится БВР или механическим способом [182].

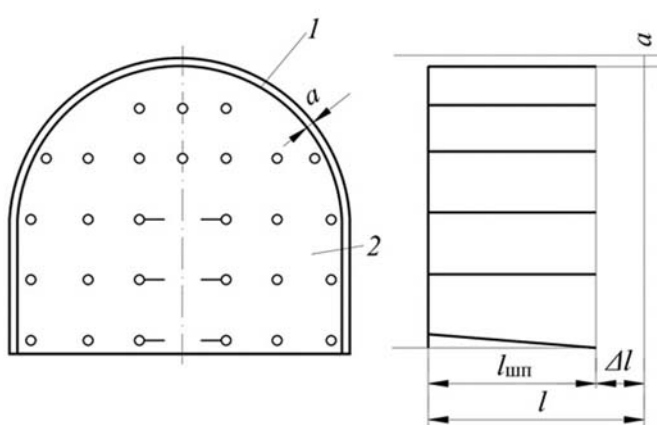


Рисунок 1.6 — Схема расположения разгрузочной щели:

1 — разгрузочная щель, 2 — разгруженная в забое порода

*Заградительные перемычки в комплексе со специальными параметрами буровзрывных работ* рекомендуются при проведении горных выработок в зонах высокой степени опасности и возводятся на определенном расстоянии от забоя. Порода взрывается в нижней части сечения выработки, что позволяет заполнить пространство

до перемычки взорванной и вынесенной выбросом породой до достижения выброса проектного контура, тем самым препятствуя его дальнейшему распространению. Наибольший эффект применение данного способа дает в выработках площадью поперечного сечения до  $20 \text{ м}^2$ .

Для канатных заградительных перемычек используется несколько схем конструкции (наиболее известные конструкции, разработанные МакНИИ, ВНИИОМШС и др.) (рисунок 1.7).

При монтаже перемычек не требуется длительной остановки забоя, что позволяет практически незначительно влиять на скорость проведения выработки. В отдельных случаях перемычки устанавливаются в несколько рядов.

Рациональная длина шпуров для выбросоопасных пород находится в пределах:  $1,6\text{--}1,8 \text{ м}$  для выработок площадью сечения вчере  $5,6\div 10,6 \text{ м}^2$ ;  $2\text{--}2,2 \text{ м}$  для выработок площадью сечения  $14,2\div 29,2 \text{ м}^2$ .

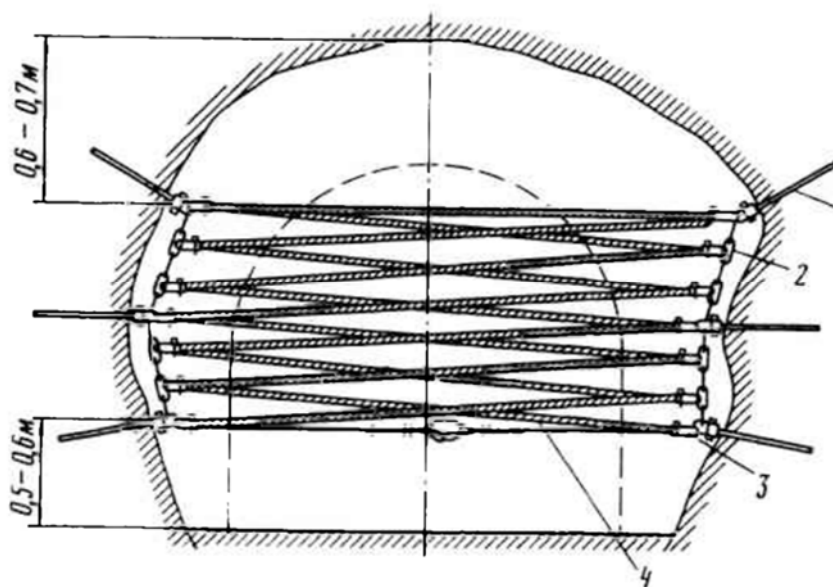


Рисунок 1.7 — Канатная перемычка:

1 — анкер; 2 — навесная цепь; 3 — серьга; 4 — канат

Средний удельный расход ВВ:  $0,8\text{--}1,4 \text{ кг/м}^3$  в породах высокой степени выбросоопасности;  $1\text{--}1,8 \text{ кг/м}^3$  в породах средней степени выбросоопасности;  $1,4\div 2,2 \text{ кг/м}^3$  — в невыбросоопасных породах.

По выбросоопасным породам в качестве ВВ рекомендуется применять аммониты ПЖВ-20, Т-19, ПВП-1А, патроны с демпфирующими прокладками и другие предохранительные ВВ.

Инициирование зарядов необходимо выполнять электродетонаторами повышенной иницирующей способности ЭД-8ПМ и ЭДКЗ-ПМ-15 с общим временем замедления не более 120 мс.

Число ступеней замедления комплекта шпуров должно быть максимальным. Одновременно взрываемое число шпуров не должно превышать шести (в одной ступени замедления). Разрыв в интервале замедления между рядом расположенными шпурами не должен превышать более одной ступени замедления. Способ инициирования зарядов прямой и обратный.

Расположение шпуров в комплекте с врубом любого типа должно обеспечить подвигание забоя на глубину шпуров и соответствующее проекту оконтуривание выработки. Непостоянное залегание выбросоопасных пород по простиранию требует регулярной корректировки схем расположения шпуров, числа одновременно взрываемых зарядов, типа и удельного расхода ВВ. Параметры буровзрывных работ необходимо изменять в соответствии с горно-геологическими условиями по данным разведочного бурения. При отсутствии геологического разреза по трассе проведения выработки параметры БВР следует корректировать с учетом фактического залегания выбросоопасных пород в забое.

Конструкции врубов выбираются в зависимости от размещения выбросоопасных пород в забое выработки [6].

Для выработок группы I: горизонтальный щелевой (рисунок 1.8, а, д); вертикальный клиновой (рисунок 1.8, в); призматический (рисунок 1.8, е). Вруб располагать у подошвы выработки.

Для выработок группы II: горизонтальный щелевой; вертикальный клиновой; двойной вертикальный клиновой (рисунок 1.9, б, г); призматический. Вруб располагать в центре забоя.

При проведении выработок по напряженным выбросоопасным породам точность бурения шпуров имеет важное значение и в особенности для врубовых

зарядов. Отклонение от заданного направления бурения смежных шпуров вертикального клинового вруба создает направленное отбрасывание породы на стенки выработки, что приводит к повреждению крепи (выбиванию или смещению стоек). Отклонение в направлении бурения от горизонтальной оси выработки ведет к нарушению крепи по своду выработки. При проведении выработок с применением вертикального клинового вруба необходимо соблюдать расстояние как между смежными шпурами, так и между рядами. Уменьшение расстояния между смежными шпурами приводит к концентрации энергии взрыва, достаточной не только для разрушения и отрыва породы, но и для развития выбросов. Максимальное подвигание забоя за цикл зависит от длины шпуров. Однако во многих случаях комплекты коротких шпуров обеспечивают большую скорость проведения выработок, т. к. шпуры располагаются в ненапряженной зоне.

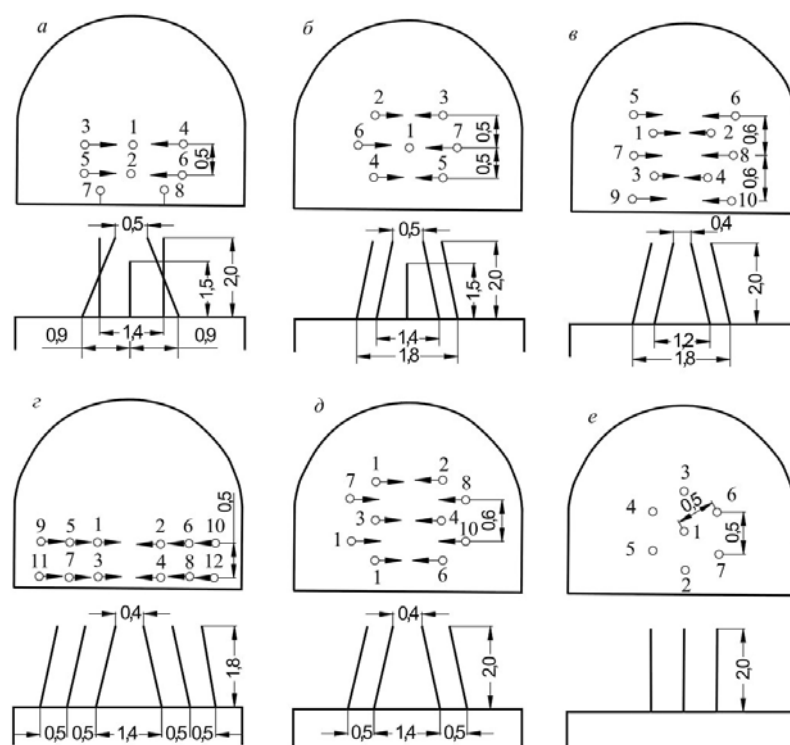


Рисунок 1.8 (а–г) — Схемы расположение врубовых шпуров в плоскости забоя в зависимости от положения выбороопасного песчаника

В напряженных выбросоопасных породах наиболее трудные условия работы по разрушению массива имеют врубовые шпуры, заряды в которых взрываются при максимальной глубине заложения.

От глубины и размеров врубовой полости и порядка взрывания зарядов во врубовых шпурах зависит подвигание забоя за цикл.

При проведении выработок по выбросоопасным породам буровзрывным способом взрывные работы ведутся в режиме сотрясательного взрывания, т. е. на время ведения взрывных работ все люди, находящиеся в шахте, должны выводиться на 1000 м по свежей струе, а взрывники на 600 м [107].

Для выработок групп III, IV и VI: вертикальный клиновой; двойной вертикальный клиновой; призматический. Вруб располагать в центре забоя.

Для выработок группы V: горизонтальный щелевой; вертикальный клиновой. Вруб располагать в выбросоопасном слое.

Анализ опытных работ позволил установить, что в результате отдельного взрывания врубовых и оконтуривающих шпуров интенсивность выбросов уменьшилась в 2-3 раза. Наряду с этим расход шпурометров на 1 м<sup>3</sup> породы уменьшился на 40–60 %, а удельный расход ВВ снизился на 30–50 %, к. и. ш. достиг 0,9–1,0. Темпы проведения выработки увеличились с 18–25 до 40 м при одновременном взрывании комплекта шпуров (рисунок 1.9).

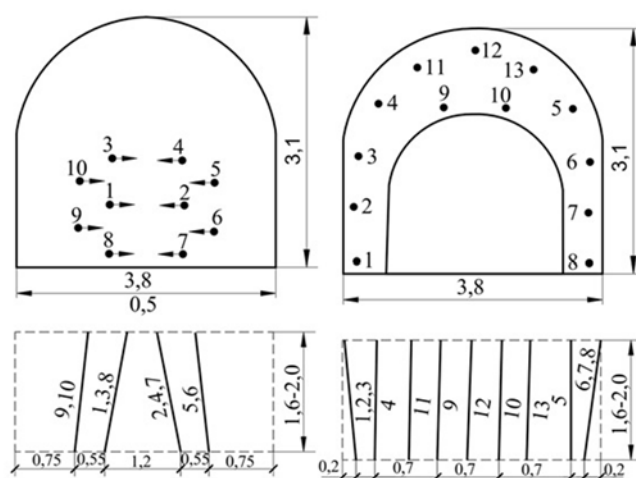


Рисунок 1.9 — Схема расположения шпуров при многоприёмном взрывании

Достоинства раздельного взрывания: после взрыва врубовых шпуров имеется возможность оценить размеры полости, которая обычно не выходит за пределы проектного контура выработки; в зависимости от толщины породного целика, оставшегося в выработке, можно уточнить число оконфуживающих шпуров и массу заряда в них.

Другой способ вскрытия выработки, если выброс опасный слой расположен во всем сечении выработки, подразумевает проведение ее опережающим забоем (рисунок 1.10).

Согласно данной технологии, площадь опережающего забоя не должна превышать  $\frac{1}{3}$  проектного сечения выработки, что позволяет исключить выбросы за пределы проектного контура выработки при взрывании опережающего забоя. При этом второй забой от опережающего должен отставать на 1-2 м более длины шпуров.

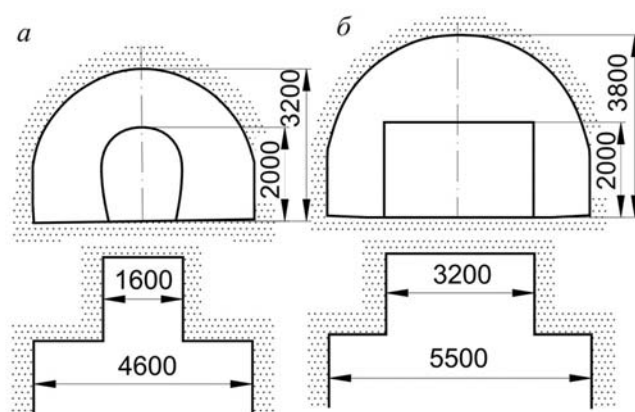


Рисунок 1.10 — Схема расположения опережающего забоя в зонах:

а) высокой степени выбросоопасности; б) невысокой и средней степени выбросоопасности

Оконтуривание проектного сечения выработки иногда не удается достичь за одно взрывание. В таком случае взрывание шпуров в отстающем забое производят в несколько очередей. Взрывные работы ведутся в сотрясательном режиме.

Применение предложенной технологии при дальнейшем проведении откаточных штреков на шахте им. А. А. Скочинского позволило достичь темпов подвигания на забой 55÷60 м в месяц.

Задачей исследований, проводимых на современном этапе, является разработка основ инженерной теории практически применяемых способов предотвращения выбросов и снижения выбросоопасности, а также разработка новых способов предотвращения выбросов, основанных на более глубоком понимании физической сущности газодинамических явлений и использовании новых достижений науки и техники. Техника и технологии, применяемые на разных рудниках, а также горно-геологические и горнотехнические условия в них существенно отличаются, поэтому перспективным представляется применить принципы разгрузки и дегазации, опробованные на угольных шахтах, в условиях ГГМ рудников на основе взрывного воздействия.

### **1.6 Методы и средства прогноза выбросоопасности пластов**

Методы прогнозов выбросоопасности пластов делятся на три категории: региональные, локальные и текущие [210, 220, 223–225, 24, 29, 36, 55, 60, 66, 71, 73, 74, 104, 110, 198]. Региональный прогноз предназначен для оценки потенциальной опасности по выбросам геологических районов, шахтных полей и новых горизонтов. Целью прогноза является определение минимальной глубины разработки, на которой возможно появление внезапных выбросов, а также установление границ зон, содержащих выбросоопасные пласты. К настоящему времени уже накоплены некоторые материалы по зональности возникновения внезапных выбросов в Донбассе и Кузбассе. Материалы по региональному прогнозу начали применяться при составлении проектов строительства шахт и подготовке новых горизонтов.

В работах [28, 147, 189] механизмы образования выбросоопасных зон описываются обобщенно, без дифференциации методов оценки состояния пластов (на региональный и текущий уровни). На практике региональный прогноз охватывает шахтопласт (или его крыло) целиком и базируется на данных геологоразведочного бурения (пластовое давление газа, начальная скорость газовыделения ( $g_2$ , л/мин), йодный показатель ( $\Delta J$ ) и минимальный коэффициент крепости угля ( $f$ ) [166, 81, 82].

Текущий прогноз, напротив, органичивается оперативной оценкой степени опасности непосредственно в призабойной части конкретной горной выработки [82, 166].

Наиболее полно в настоящее время разработаны методы локального прогноза, назначением которого является определение степени выбросоопасности пласта в пределах шахтного поля перед вскрытием его квершлагами и выделение на пластах в пределах разрабатываемого этажа опасных и неопасных участков по простиранию [138].

Для своевременного обнаружения на выбросоопасных пластах зон повышенной опасности, а также для контроля эффективности применяемых мер борьбы с выбросами осуществляется текущий (непрерывный) прогноз, основанный на наблюдениях за изменениями шумности пласта и вмещающих пород (для очистных забоев), начальной скорости газовыделения, крепости угля и мощности пачек пласта (для очистных забоев, подготовительных и нарезных выработок).

Применяется сейсмоакустический метод оценки и текущего прогнозирования выбросоопасности угольных пластов при их отработке.

При движении очистного забоя в угле происходит перераспределение напряжений, вызывающих нарушение наиболее слабых прочностных связей в материале. Нарушение этих связей (образование трещин) сопровождается выделением в окружающую среду энергии в различных ее видах, в том числе и в виде колебаний окружающей среды. Установлено, что при движении очистного забоя по простиранию процесс трещинообразования происходит неравномерно. В пласте угля выделяются области, отработка которых сопровождается усиленным трещинообразованием, отмечаемым увеличением абсолютного числа сейсмоакустических импульсов, зарегистрированных в единицу времени.

Динамические явления, происходящие в угле и вмещающих породах, отмечаются только в зонах пласта, отработка которых сопровождается значительной шумностью (количество импульсов, зарегистрированных за 1 ч наблюдений). Эти зоны названы потенциально опасными. Разделение пласта на потенциально опасные и безопасные зоны проводится по простиранию пласта, в направлении движения очистного забоя.



Выбросоопасные зоны имеют ограниченные размеры. Изучение распределения потенциально опасных зон в пространстве позволило установить, что около 70 % протяженности выбросоопасных пластов относится к безопасным зонам. Средний размер потенциально опасных зон более чем на 40 пластах Донбасса равен 20 м по простиранию. В отдельных случаях протяженность этих зон достигает 100 м и более.

Наблюдая за изменением в сейсмоакустическом режиме пласта, можно выделить в нем зоны, при отработке которых вероятны динамические явления, и зоны, в которых динамические явления, как правило, отсутствуют. Для предсказания входа очистного забоя в ту или иную зону используется тот факт, что очаг трещинообразования практически совпадает с областью повышенных напряжений впереди угольного забоя на 4–6 м. Поэтому при регистрации изменений в сейсмоакустическом режиме пласта фактически оценивается ситуация в пласте впереди забоя на это расстояние [27, 124].

Расчет прогноза ведется по шумности, зарегистрированной при работах по углю. Усредняя значения шумности в постоянном 30-часовом интервале, сдвигающемся каждые сутки на число часов работы по углю, имеется возможность оценить предстоящие изменения в сейсмоакустическом режиме пласта.

При проведении подготовительных и нарезных выработок разработан метод текущего прогноза выбросоопасных зон, который основывается на изменении физико-механических свойств угля и его газодинамического режима.

При движении забоев горных выработок происходит постепенное повышение начальной скорости газоотдачи пласта до выбросоопасных значений. В качестве критерия принято увеличение начальной скорости газовыделения до величины 4 л/мин и более. Выбросоопасной зоной считается участок угольного пласта, на котором коэффициент крепости угля достигает минимальных значений, а закономерный рост начальной скорости газовыделения сменяется резким ее снижением вследствие снижения газопроницаемости угольного массива в выбросоопасной зоне по сравнению с переходной.

Известно, что локальный прогноз применяется на протяжении длительного времени и играет большую роль в борьбе с внезапными выбросами угля и газа. В настоящее время накоплен практический опыт локального прогноза, подготовлены

соответствующие временные руководства и методики по прогнозированию выбросоопасных зон. Широкое применение локального прогноза на шахтах позволит не только переводить в категорию опасных пласты до того, как на них произойдут внезапные выбросы, но и на тех участках, где они не вызываются необходимостью.

Однако этим задачи локального прогноза не ограничиваются. В дальнейшем необходимо использовать признаки выбросоопасности пластов для оценки эффективности мер борьбы с внезапными выбросами угля и газа. Для этого необходимо изучить изменения свойств пластов и процессов в угольном массиве под влиянием применяемых противовыбросных мер. Это позволит создать методику выбора мер борьбы с внезапными выбросами и научно обоснованного расчета их параметров в зависимости от горно-геологических условий залегания выбросоопасных пластов и степени их опасности.

## **1.7 Выводы по главе 1**

1. Анализ геологических и тектонических факторов выбросоопасности по угольным пластам шахт приводит к неопровержимому выводу, что наличие вертикальной зональности локальных выбросоопасных зон является результатом тектонических процессов, образовавших сходные условия залегания угольных пластов в пределах отдельных блоков. При этом в пределах одного и того же тектонического блока группа смежных пластов испытывала одни и те же виды тектонического воздействия, которые чаще всего приводили к подвижкам и смещениям преимущественно в плоскости пластов — наиболее пластичных и податливых слоях в геологическом разрезе. Очевидно, ширина зон тектонической препарации угольных пластов захватывала большую часть отдельных тектонических блоков, что подтверждается наличием в горных выработках препарированных отдельных пачек или всего пласта в целом (раздувы, пережимы, раздробленность) и большого числа мелких разрывных нарушений.

2. Выбросы угля, пород, солей и газа являются результатом сложного многофакторного взаимодействия ряда природных компонентов и их состояний

при отработке горного массива. Однако роль каждого из этих факторов, причины возникновения такого взаимодействия в каждом конкретном случае разные. Из изложенного следует важный вывод, что ни одна из существующих теорий и гипотез не описывает многообразные процессы газодинамических явлений в угольных шахтах и рудниках, формы проявления которых были рассмотрены в предыдущей главе. В лучшем случае они объясняют природу и механизм отдельных форм проявления выбросов, т. е. отдельные явления, но не их совокупность.

3. В настоящее время существует достаточно развитая теория и накоплен большой практический опыт определения ГДЯ и выбора мероприятий по предотвращению их в угольных шахтах. Однако до недавнего времени считалось, что рудные месторождения в силу их генезиса в отличие от пластовых месторождений угля не обладают признаками газодинамической опасности. Поэтому в данной классификации не учтены ГДЯ на рудных месторождениях, которые стали активно проявляться в последние десятилетия. В связи с этим актуальными задачами является определение условий проявления и механизма возникновения ГДЯ на рудных месторождениях, их принципиальных отличий от угольных.

4. Для локального прогноза выбросоопасности разработаны и применяются различные геофизические и скважинные методы, однако многообразие форм и механизмов ГДЯ в различных ГГУ диктует необходимость дальнейшего совершенствования комплексных методик прогноза с повышением оперативности и точности за счет применения геофизических методов и приборов, как для угольных, так и рудных месторождений.

5. Задачей исследований, проводимых на современном этапе, является разработка основ инженерной теории практически применяемых способов предотвращения выбросов и снижения выбросоопасности, а также разработка новых способов предотвращения выбросов, основанных на более глубоком понимании физической сущности газодинамических явлений и использовании новых достижений науки и техники. Техника и технологии, применяемые на

рудниках, а также горно-геологические и горнотехнические условия существенно отличаются, поэтому перспективным представляется применить принципы разгрузки и дегазации, опробованные на угольных шахтах, в условиях ГГМ рудников на основе взрывного воздействия.

6. Высокая удельная трудоемкость противовыбросных мероприятий локального характера на 1 п. м проведения выработок по газонасыщенным горным массивам существенно снижает темпы проходки и экономические показатели горных предприятий. В связи с этим перспективным направлением является разработка способов предотвращения ГДЯ в условиях рудных и угольных месторождений на основе создания по трассе проведения выработки протяженной и равномерной техногенной трещиноватости в сочетании с мерами по дегазации массива.

## **Глава 2. ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЫБРОСООПАСНЫЙ УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ С ЦЕЛЬЮ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ**

### **2.1 Общие вопросы барьерной дегазации угольного пласта**

Поинтервальное гидровоздействие применяют для повышения эффективности барьерной дегазации угольных пластов в шахтных условиях, с целью снижения их выбросоопасности.

Исследования [105, 139] показали, что ограждающая дегазация как способ борьбы с метановыделением при проведении горных выработок по пластам, склонным к выбросам угля и газа, может быть эффективной, если величина газовыделения составляет 3,5–5 м<sup>3</sup>/мин независимо от длины тупиковой части выработки. Если метановыделение превышает 5 м<sup>3</sup>/мин, а длина тупиковой части выработки составляет более 750 м, то применение дегазации становится необходимым. Эффективность дегазационных работ при этом в значительной мере зависит от параметров режима работы дегазационных скважин, который характеризуется величиной разрежения и продолжительностью откачивания.

Разрежение в дегазационных скважинах следует поддерживать в пределах 0,1–0,2 кгс/см<sup>2</sup> (75–150 мм рт. ст.). В тех случаях, когда при таком разрежении эффективность дегазации недостаточна и содержание метана в отсасываемой из скважин газовой смеси довольно высокое (не менее 50–60 %), целесообразно повысить разрежение до 0,3 кгс/см<sup>2</sup> (230 мм рт. ст.). Поддержание в скважинах более высокого разрежения, как правило, не приводит к существенному увеличению метаноотдачи скважин и эффективности дегазации. При разрежении более 0,3 кгс/см<sup>2</sup> значительно возрастают подсосы воздуха в скважины, что приводит к излишним затратам. Отсос газа из скважин при разрежении менее 0,1 кгс/см<sup>2</sup> не обеспечивает достаточной эффективности дегазации. Последнее может вызвать необходимость бурения дополнительных скважин или увеличения диаметра существующих скважин, что экономически нецелесообразно.

В скважинах, расположенных в непосредственной близости от забоя выработки, рационально поддерживать разрежение выше, чем в скважинах более удаленных. Такая необходимость появляется ввиду того, что в призабойной зоне угольного массива еще сохраняется высокая газонасыщенность и относительно низкая воздухопроницаемость, в то время как удаленные от забоя участки угольного массива имеют уже более высокую воздухопроницаемость при пониженной по сравнению с первыми газоотдаче. С учетом последнего целесообразно производить регулирование разрежения, понижая его с удалением скважин от забоя. Такое понижение разрежения следует производить по мере падения концентрации метана в отсасываемом из скважин газе до 30–40 %.

Продолжительность отсасывания (срок службы дегазационной скважины) определяется временем проведения участка выработки, огражденного данной скважиной, отсчитываемым с момента включения скважины в работу, и физико-механическими свойствами угольного пласта.

Продолжительность отсасывания может быть определена по формуле

$$T = 30 \left( \frac{l_c - l_z}{V} + 0,5 \right), \text{ суток}, \quad (2.1)$$

где  $l_c$  — длина скважины, м;

$l_z$  — расстояние от забоя выработки до устья скважины к моменту ее подключения к дегазационной системе, м;

$V$  — скорость подвигания забоя выработки, м/мес [176].

При решении вопроса об отключении скважин следует руководствоваться условием

$$\frac{C Q_v - \sum 100 q_m}{Q_v} < C_0, \quad (2.2)$$

где  $Q_v$  — количество воздуха, проходящего по дегазуемой выработке, м<sup>3</sup>/мин;

$C$  — концентрация метана в вентиляционной струе, %;

$C_0$  — концентрация метана, допустимая Правилами безопасности, %;

$q_m$  — суммарный дебит метана из скважин, подлежащих отключению, м<sup>3</sup>/мин.

Условием (2.2) не учитывается, что из скважины, подлежащей отключению, извлекается больше метана, чем его выделилось бы в выработку с поверхности угольного массива, ограждаемого данной скважиной. Это является гарантией того, что концентрация метана в выработке после отключения дегазационных скважин не превысит допустимой величины.

Расстояние  $a$  между боковой стенкой угольного массива и скважиной должно находиться в пределах 1,5–2 м. При уменьшении этого расстояния резко возрастают подсосы воздуха, а с его увеличением скважина попадает в зону повышенных напряжений, где метаноотдача пласта понижена. По этим же причинам скважина должна быть направлена параллельно выработке.

Длина скважин принимается исходя из возможностей буровой техники и необходимости соблюдения параллельности скважины направлению выработки. При существующей буровой технике с учетом организации работ можно рекомендовать длину скважин 50–100 м.

Для барьерной дегазации можно бурить скважины диаметром 76–300 мм. Наиболее целесообразно по технико-экономическим соображениям применять диаметр скважин 76–130 мм.

Суммарное количество скважин с обеих сторон выработки, обеспечивающее требуемое снижение газообильности, зависит от их диаметра, мощности пласта и скорости проведения выработки. Практически это количество скважин должно составлять 1, 2, 4. Бурение более четырех скважин нецелесообразно, а трех — нерационально по той причине, что в последнем случае одна из них будет работать недостаточно эффективно, в результате чего снижение газообильности выработки за счет применения дегазации будет ниже требуемого.

Суммарное количество скважин с обеих сторон выработки необходимо выбирать, варьируя их диаметром из условия

$$n \geq \frac{m\alpha_r}{23 + d(134 - 0,06V)}, \quad (2.3)$$

где  $m$  — мощность пласта, а;

$\alpha_r$  — требуемое относительное снижение метанообильности выработки, которое может быть достигнуто только за счет снижения газовыделения из боковых стенок угольного пласта, %;

$d$  — диаметр скважины, м;

$V$  — скорость проведения выработки, м/мес.

Предельное значение  $\alpha_r$  для условий, при которых отсутствует метановыделение из боковых поверхностей пласта, огражденных активным участком ( $l_c - l_r$ ) скважины, определяется из выражений:

$$\alpha_r \leq [80 - 0,4(V - 100)] \frac{l_c - l_r}{L}, \quad (2.4)$$

где  $l_c$  — длина дегазационной скважины, м;

$l_r$  — длина участка герметизации дегазационной скважины, м;

$L$  — шаг бурения дегазационных скважин (шаг камер), м;

$$L = l_c + l_1 + l_k, \text{ м}, \quad (2.5)$$

где  $l_1$  — расстояние от забоя дегазационной скважины до ближайшей стенки камеры, м;

$l_k$  — длина камеры, м.

Если при принятом количестве скважин окажется, что величина  $\alpha_r$ , найденная из условия (2.3), больше требуемой, то необходимо уменьшить диаметр скважин или увеличить расстояние  $l_1$ , а следовательно, и  $L$  с тем, чтобы ожидаемое снижение газообильности выработки было равно требуемому. В том случае, когда при данном числе скважин величина  $\alpha_r$ , определенная из условия (2.3), меньше требуемой, т. е. ожидаемая эффективность дегазации ниже заданной, необходимо увеличить диаметр скважин до такого значения, которое обеспечило бы нужное снижение газообильности.

Длину герметизации устья скважин необходимо принимать равной расстоянию от последней скважины до стенки выработки. При меньшей длине увеличиваются подсосы со стороны устья скважины; удлинение участка герметизации не приводит к увеличению эффективности дегазации, а лишь уменьшает активную (рабочую) длину скважины.



Расположение скважин должно обеспечивать наиболее эффективную их работу. Одиночные скважины ориентируют на зоны интенсивного выделения метана (преимущественно в кровле) либо центрируют по мощности пласта. При групповой дегазации (2 или 4 скважины) применяется схема их равного распределения относительно сторон выработки [176]. Если же по одну сторону выработки бурятся две скважины, то располагать их необходимо одну под другой на расстоянии  $\frac{m}{4}$  от кровли и почвы пласта.

Однако использование барьерной дегазации не всегда бывает эффективным при проведении выработок по выбросоопасным пластам, что приводит к аварийным ситуациям.

В этом отношении в качестве одного из методов увеличения проницаемости обработанной зоны угольного пласта используется поинтервальное гидровоздействие, в результате которого происходит образование новых трещин и раскрытие имеющихся естественных трещин. При поинтервальном гидроразрыве зона воздействия на стенки скважины значительно уменьшена, вследствие чего напорно-расходные характеристики насосного оборудования будут максимально использованы в ограниченном интервале во время гидровоздействия. Данная технология обеспечивает быструю проницаемость жидкости в массив, что, в свою очередь, позволяет снизить время на проведение мероприятия. Трещины, образовавшиеся в процессе поинтервального гидровоздействия, достигают в длину от 5 до 12 метров и, соединяясь со скважинами барьерной дегазации, значительно увеличивают проницаемость угольного пласта. С механической точки зрения поинтервальный гидроразрыв приводит к образованию дренажных каналов с высокой проводимостью и протяженностью за счет раскрытия естественных систем трещин и распространения новых.

В следующем параграфе остановимся на более важных аспектах интервального гидроразрыва в рамках задач данной научно-исследовательской работы.

## 2.2 Поинтервальный гидроразрыв угольных пластов малой и средней мощности: подход к оптимизации

Определение эффективных параметров поинтервального гидроразрыва (ПГРП) угольных пластов в виде законченной методики, пригодной для всех (большинства) ГГУ на шахтах Кузбасса, связано со значительными трудностями увязывания большого числа требований и ограничений технического, организационного и экономического характера, вызванных ГГУ и технологиями проходки и добычи на конкретном предприятии.

ПГРП может иметь несколько назначений. В настоящей работе он рассматривается как компонент более общей технологии барьерной дегазации угольных пластов, призванной снизить интенсивность или исключить ГДЯ в шахтах. Здесь ПГРП применяется для увеличения проницаемости угольных пластов и дебита скважин барьерной дегазации по трассе проведения выработки.

Основная идея ПГРП как варианта гидроразрыва пласта состоит в создании в пласте новых трещин и раскрытии уже имеющих естественных трещин путем закачки в толщу пласта жидкости под давлением через предварительно пробуренную скважину.

Принципиальная схема технологии ПГРП показана на рисунке 2.1, список основных понятий приведен в таблице 2.1.

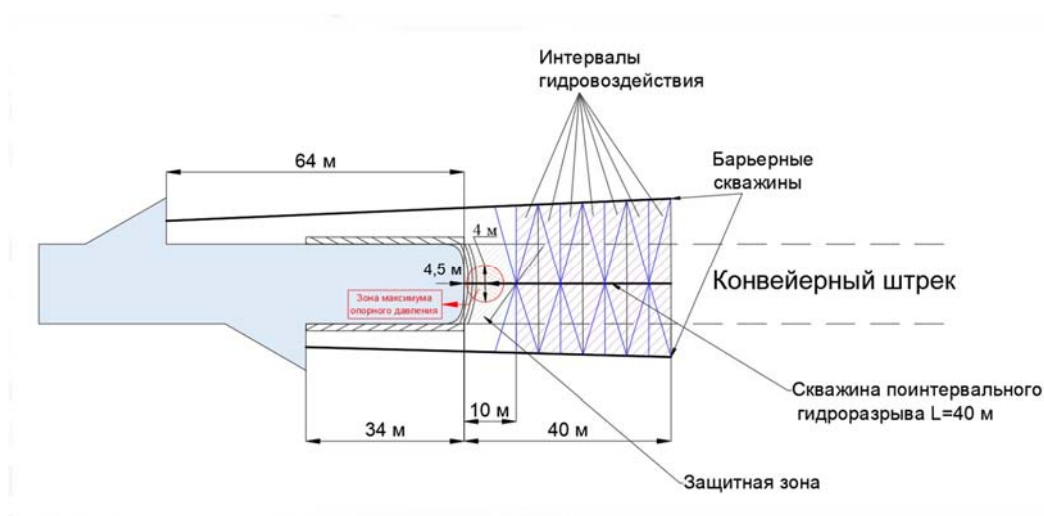


Рисунок 2.1 — Схема поинтервального гидроразрыва

Таблица 2.1 — Основные понятия и величины ПГРП

Название	Определение	Технологическое значение и требуемое (ожидаемое) значение
Длина трещины $L$	Максимальное расстояние, на которое искусственно созданная трещина может распространиться в массиве пород в процессе гидроразрыва. Для пластов угля и горизонтальных скважин из забоя предполагается, что на максимальное расстояние трещина распространяется перпендикулярно оси скважины в плоскости пласта	Напрямую определяет площадь контакта с пластом, что повышает дебит скважины дегазации. Должна быть достаточной для пересечения скважин дегазации на любом удалении от скважины гидроразрыва. Избыточная длина повышает риски выхода трещины в соседние выработки. Приемлемый диапазон значений для пластов малой и средней мощности 8–12 м (6–15 м)
Ширина раскрытия трещины $W$	Расстояние между стенками искусственно созданной трещины в массиве пород, измеряемое в направлении, перпендикулярном ее распространению	Критически важный параметр для эффективности гидроразрыва, так как определяет проводимость трещины для оттока метана. В угольных пластах из-за низкой прочности и естественной трещиноватости требуется контроль ширины для предотвращения внутренних обрушений. Приемлемый диапазон значений для угля 2–10 мм
Высота трещины $H$	Вертикальный размер трещины, то есть расстояние, на которое она распространяется вверх и вниз от точки инициации в процессе гидроразрыва. Для пластов угля и горизонтальных скважин из забоя предполагается, что высота трещины ограничена мощностью пласта	При проектировании гидроразрыва предполагается, что угольный пласт ограничен сверху и снизу более прочными породами и трещина из угольного пласта не прорастает в них. Фактически это допущение определяется конкретными ГГУ и требует проверки. В случае слабых ограничивающих слоев в некоторых исследованиях принимается $H = 2,5 \text{ м}$
Эффективное давление $P_{ef}$	Разность между давлением, с которым закачивается жидкость разрыва, и давлением смыкания трещины должна превышать сумму минимального горизонтального напряже-	$P_{ef} > \sigma_{h,min} + T$ Определяет возможность возникновения и роста трещины. Если принять предел прочности угля на разрыв 0,8–4,5 МПа, то требуемое значение

Название	Определение	Технологическое значение и требуемое (ожидаемое) значение
	ния $\sigma_{h,min}$ и прочности угля на разрыв $T$	$P_{ef}$ может находиться в диапазоне 4,8–20 МПа
Минимальное горизонтальное напряжение $\sigma_{h,min}$	Зависит от глубины залегания, механических свойств угля и тектонических условий	Для угольных месторождений на глубинах 300–1000 м диапазон значений составляет 4–15 МПа
Коэффициент утечки $C_L$	Одна из характеристик проницаемости горного массива, которая показывает интенсивность проникновения жидкости через стенки создаваемой трещины или определяет, какая часть закачиваемой жидкости поглощается пластом вместо того, чтобы участвовать в раскрытии и распространении трещины	Развитые модели определяют коэффициент утечки как объем жидкости, который фильтруется в горный массив на единицу площади трещины за единицу времени при перепаде давления $C_L \propto \sqrt{\frac{k \times \Delta P}{\mu}},$ где $\mu$ — вязкость жидкости; $k$ — проницаемость породы; $\Delta P$ — перепад давления. Для точного определения коэффициента проводят лабораторные или полевые тесты. Упоминаемые значения в исследованиях, связанных с добычей метана из угольных пластов с гидроразрывом, находятся в диапазоне $4 \cdot (10^{-5} \dots 10^{-4} \text{ м}/\sqrt{\text{с}})$
Модуль плоской деформации $E'$	Параметр типа модуля упругости, используемый для описания деформации горного массива в условиях, когда деформация в одном из направлений (здесь ширина раскрытия трещины) пренебрежимо мала. Этот параметр критически важен для моделей гидроразрыва, где предполагается, что трещина распространяется в плоскости, а деформации в третьем измерении (ширина) существенно ограничены	$E' = \frac{E}{1-\nu^2},$ где $E$ — модуль упругости Юнга; $\nu$ — коэффициент Пуассона. Диапазоны значений для угля: модуль Юнга 2–8 ГПа; коэффициент Пуассона 0,2–0,48
Темп (скорость) закачки жидкости разрыва $q$	Скорость (расход) жидкости гидроразрыва, с которой она подается насосным оборудованием в скважину	15–45 л/мин или $(25 \dots 75) \times (10^{-5} \text{ м}^3/\text{с})$

Название	Определение	Технологическое значение и требуемое (ожидаемое) значение
Время закачки жидкости разрыва $t$	Общее время закачки жидкости гидроразрыва до достижения ожидаемого эффекта увеличения дебита скважин дегазации	240–600 с
Пакер	Специальное устройство, используемое для изоляции целевого интервала скважины во время проведения гидроразрыва	Пакер создает механический барьер между обрабатываемым интервалом скважины в пласте и остальной ее частью, фокусируя давление жидкости на целевом интервале. В итоге получается существенная экономия жидкости и времени гидроразрыва
Межпакерное расстояние	Расстояние между изолирующими прокладками (уплотнителями) пакера, внутри которого создается давление гидроразрыва	Может ограничиваться возможностью продвижения пакера по изгибам скважины (если есть). Оцененные размеры: 10–40 см
Диаметр пакера	Диаметр изолирующих прокладок (уплотнителей) пакера	Определяется диаметром скважины гидроразрыва
Расстояние между интервалами	Минимальное расстояние между интервалами гидроразрыва, при котором длина распространения трещин максимальна	Важный технологический параметр, который позволяет создать наиболее интенсивную трещиноватость квазиравномерно по длине скважины. Определяется по результатам опытных закачек по максимальному значению давления жидкости в течение времени, необходимого для создания трещиноватости с требуемыми для эффективной работы барьерной дегазации параметрами

Представленные в таблице 2.1 понятия в прикладном аспекте составляют комплекс факторов, определяющих успешность проведения гидроразрыва. Их можно разделить на три группы по степени управляемости:

1. Неуправляемые (локальные ГГУ): модуль плоской деформации, коэффициент утечки, высота трещины в связи с мощностью пласта, минимальное горизонтальное напряжение.

2. Управляемые технологические: скорость закачки жидкости, время закачки жидкости.

3. Управляемые конструктивные: длина пакера, диаметр пакера, межпакерное расстояние.

Длина трещины, ширина раскрытия трещины и эффективное давление являются целевыми характеристиками гидроразрыва, формирующимися в результате сложного взаимодействия управляемых и неуправляемых факторов в каждом конкретном случае. В шахтных условиях реально управляемыми оказываются темп и время закачки, а также расстояние между интервалами.

Пакерный комплект выбирается, как правило, на стадии выбора технологии ведения работ на шахте во взаимной увязке с буровым и насосным оборудованием, буровым инструментом и технологией бурения. Поэтому интерес представило исследование того, как выбор непосредственно управляемых параметров гидроразрыва влияет на его эффективность.

Для прогнозирования целевых характеристик гидроразрыва разработано достаточное количество математических моделей, позволяющих оценить ожидаемые их значения. Можно отметить как самые известные и неоднократно проверенные: модель Перкинса – Керна – Нордгрена (РКН), Христиановича – Гиртсма – де Клерка (КГД) и радиальная модель.

В таблице 2.2 приведены зависимости, полученные из модели РКН для длины и ширины раскрытия трещины, а также эффективного давления. Сложность этих уравнений не позволяет разрешить их относительно скорости закачки  $q$  и времени закачки  $t$ , подставляя требуемые (желаемые) значения характеристик трещины и другие параметры [211–212, 207].

Поэтому в работе проведен численный расчет с подстановкой в уравнения таблицы 2.1 различных комбинаций параметров исходных данных и вычисление соответствующих характеристик трещин. Затем проведена фильтрация полученных комбинаций из условий минимально приемлемых значений длины, ширины раскрытия трещины и эффективного давления (таблица 2.3). После чего оценены предельные и

средние значения скорости и времени закачки, при которых реализуются минимальные характеристики трещин.

Таблица 2.2 — Модель Перкинса – Керна – Нордгрена (РКН)

Наименование параметра	Формула расчета
Длина трещины $L$	$x_f = 0,45 \left[ \frac{E' q^3}{\mu h^4} \right]^{1/5} t^{1/5}$
Ширина раскрытия трещины $W$	$w = 1,91 \left[ \frac{q^2 \mu}{E' h} \right]^{1/6} t^{1/5}$
Эффективное давление $P_{ef}$	$p_{ef} = 1,52 \left[ \frac{q^2 E' \mu}{h^6} \right]^{1/5} t^{1/5}$

Таблица 2.3 — Значения технологических параметров гидроразрыва, при которых выполняются минимальные требования по характеристикам трещин из 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 закаченной 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 2.3, 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 мин., а средний расход на один интервал около 654 л. Эти значения были приняты в качестве ориентировочных при организации опытно-промышленных работ.

Для осуществления поинтервального гидроразрыва выбросоопасного угольного пласта через скважины разработаны специальные технические средства. Основное техническое средство — разрывное устройство, предназначенное для поинтервального

разрыва угольного массива с целью увеличения интенсивности газовыделения при дегазации угольного пласта<sup>1</sup>.

Разрывное устройство (рисунок 2.2) состоит из двух упругорасширяющихся герметизаторов 1, 2 диаметром 76 мм, между которыми установлен распределитель давления 3, предназначенный для регулирования давления рабочей жидкости в гидросистеме разрывного устройства.

Схема расположения оборудования в скважине показана на рисунке 2.3.

Контроль параметров поинтервального гидроразрыва осуществляется специальной контрольно-измерительной аппаратурой, которая включает в себя: манометр, расходомер, радиодатчик давления жидкости. Запись расхода жидкости производится при помощи расходомера, в состав которого входит вычислитель расхода и турбинный преобразователь расхода, что позволяет оценить параметры процесса гидроразрыва.

Для контроля давления нагнетания жидкости, записи показаний и последующего анализа его режима в процессе выполнения поинтервального гидроразрыва используется радиодатчик давления шахтовый. Радииодатчик давления шахтовый осуществляет мониторинг, сбор и передачу данных по радиоканалу на ПК для последующей обработки информации о процессе выполнения поинтервального гидроразрыва при помощи специализированного ПО. Результатом обработки данных является график, отражающий в динамике процесс выполнения поинтервального гидроразрыва в скважине. На графике по оси ординат отстраивается давление жидкости в атмосферах, по оси абсцисс – дата и время нагнетания жидкости.

---

<sup>1</sup> Пат. 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.





Рисунок 2.2 — Разрывное устройство:

1, 2 — упругорасширяющиеся рукава,  
3 — межпакерный клапан, 4 — наконечник запорный, 5 — муфта присоединительная

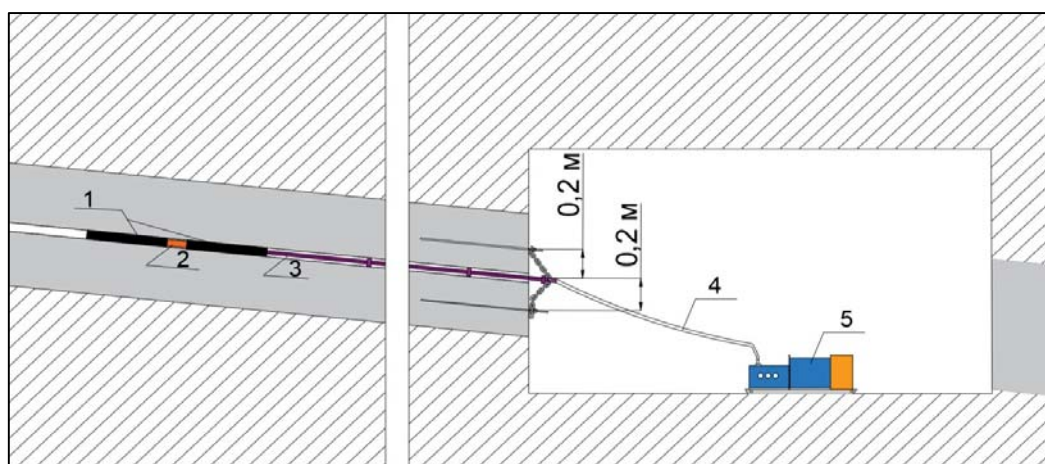


Рисунок 2.3 — Схема расположения оборудования:

1 — герметизатор, 2 — регулируемый распределитель давления (клапан),  
3 — трубки (штанги) высокого давления, 4 — рукав высокого давления,  
5 — насосная установка типа УНИ-01

### 2.3 Шахтные испытания метода поинтервального гидровоздействия на выбросоопасный пласт

Экспериментальные работы по поинтервальному гидровоздействию были выполнены в условиях ООО «Шахта им. С. Д. Тихова» при проведении конвейерного штрека 23-1-6, наклонного вентиляционного ствола № 2, конвейерного штрека 23-1-7 и путевого уклона № 1 по пласту 23 и др.

#### *Горно-геологическая характеристика угольного пласта 23*

Пласт угля 23 имеет в основном простое строение, состоит из одной-двух угольных пачек, разделенных породным прослоем, представленным алевролитом мелкозернистым, интенсивно трещиноватым, с коэффициентом крепости по шкале проф. М. М. Протодяконова  $f = 2-3$ , мощностью до 0,05 м. Средняя мощность породного прослоя — 0,02 м (рисунок 2.4).

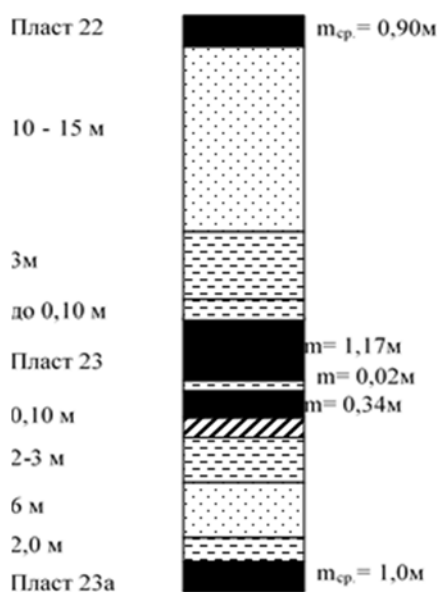


Рисунок 2.4 — Литологическая колонка угольного пласта 23

Мощность угольного пласта 23 колеблется от 1,28 до 1,69 метра, при средней  $m_{\text{чуп}} = 1,51$  м,  $m_{\text{пл}} = 1,53$  м.

Уголь марки Ж пласта 23 полублестящий, трещиноватый, с коэффициентом крепости по шкале проф. М. М. Протодяконова  $f = 1,5$ . Гипсометрия пласта волнистая, угол падения по штреку 1-2 градуса.

Уголь пласта разбит двумя системами трещин: основного и торцевого кливажа.

Азимут простирания плоскостей трещин основного кливажа 145–170 градусов, угол падения трещин кливажа несогласный и равен 80–87 градусам. Торцевой кливаж выражен слабо.

В угольном пласте 23 встречаются минерализованные включения — колчеданы, вытянутой овальной формы, размером до  $0,40 \times 0,20 \times 0,20$  м, крепостью  $f = 7$  и более. Колчеданы приурочены к верхней части пласта. По данным ранее проводимых геолого-разведочных работ, коэффициент конкрециеносности пласта 23 составляет 7 %.

Природная газоносность – 20–22 м<sup>3</sup>/т и более.

Угольный пласт 23 характеризуется взрывоопасностью угольной пыли. Угрожаемость по горным ударам устанавливается начиная с глубины 200 м, по внезапным выбросам угля и газа – опасен с отметки 310 м. Уголь пласта 23 не склонен к самовозгоранию.

В стратиграфическом разрезе можно выделить следующие слои:

*Ложная кровля* распространена отдельными локальными участками, сложена алевролитом мелкозернистым, слабым, трещиноватым, с многочисленными отпечатками р. о. и зеркалами скольжения на плоскостях трещин. Мощность ложной кровли 0–0,30 м, при средней — 0,10 м, крепость  $f = 1,5–2,0$ . Ложная кровля обрушается вслед за выемкой угля.

*Непосредственная кровля* пласта представлена алевролитами мелкозернистыми, средней крепости,  $f = 3–4$ , от слабо до интенсивно трещиноватых, мощностью 3 м.

Непосредственная кровля пласта 23 определена как средней устойчивости и отнесена к I типу по обрушаемости и ко II классу по устойчивости с допустимой площадью обнажения до 10 м<sup>2</sup> в течение 1 часа. В зонах влияния дизъюнктивных нарушений, локальных зонах повышенной трещиноватости горных пород кровли —

неустойчивая, с допустимой площадью обнажения до 6 м<sup>2</sup> в течение 20 минут, склонна к сводчатому обрушению, с образованием куполов до 3–5 м.

В зонах влияния дизъюнктивных нарушений, локальных зонах повышенной трещиноватости горных пород кровли — неустойчивая, с допустимой площадью обнажения до 6 м<sup>2</sup> в течение 20 минут, склонна к сводчатому обрушению, с образованием куполов до 5 м.

*Основная кровля* пласта сложена песчаником мелкозернистым, крепостью  $f = 7-8$ , переслаиванием с алевролитом крупнозернистым, крепостью до  $f = 5-6$ . Мощность основной кровли 10,0–15,0 метра, в основном отнесена к среднеобрушаемой.

Ниже пласта угля, не повсеместно, прослеживается ложная почва.

*Ложная почва* сложена аргиллитом углистым, реже — алевролитом мелкозернистым, интенсивно трещиноватым, слабым. Крепость  $f = 0,5-2,1$ , мощность 0,0–0,35 м, при средней — 0,10 м. Ложная почва склонна к пучению и размоканию при намокании.

*Непосредственная почва* пласта представлена переслаиванием алевролитов мелкозернистых с алевролитами крупнозернистыми, плотными, слоистыми, не трещиноватыми, крепостью  $f = 4-6$ , мощностью 2–3 метра.

*Основная почва* пласта 23 сложена песчаниками мелкозернистыми, светло-серыми, монолитными, не трещиноватыми, крепкими —  $f = 6-8$ . Мощность слоя — 6 м.

Из опыта ведения горных работ по пласту 23, при проведении подготовительного забоя проектируемого конвейерного штрека № 23-1-6 возможны встречи:

- зон локальной повышенной трещиноватости пород кровли, трещин тектонического характера;
- пликативных и мелкоамплитудных дизъюнктивных нарушений;
- замещений угольного пласта на полную мощность вмещающими горными породами — размывов.

Размывы представлены песчаниками мелкозернистыми, минерализованными, крепкими,  $f = 8$ . Ширина зон размывов — 3–5 м.

Прогнозируемые зоны пликативной и мелкоамплитудной нарушенности угольного пласта, размывы характеризуются повышенной трещиноватостью вмещающих горных пород, увеличенным газовыделением.

Ожидаемый приток воды в выработку в локальных зонах повышенной трещиноватости при встрече дизъюнктивных нарушений, открытых тектонических трещин – до 5 м<sup>3</sup>/ч. Также возможно выделение воды по пробуренным шпурам под анкерную крепь при вскрытии ими водонасыщенных пород основной кровли – песчаников.

В таблице 2.4 приведены имеющиеся и возможные опасные горно-геологические факторы, характерные для пласта 23.

Таблица 2.4 — Имеющиеся и возможные опасные горно-геологические факторы

Наименование зоны	Параметры
Опасная зона № 61. С глубины 200 м пласт 23 угрожаем по горным ударам	Повышенное горное давление, повышенная трещиноватость вмещающих горных пород кровли
Опасная зона № 93. С глубины 310 м пласт 23 опасен по внезапным выбросам угольной пыли и газа метана	Возможные внезапные выбросы газа метана, угольной массы

## 2.4 Результаты поинтервального гидроразрыва пласта

10.03.2021 и 14.03.2021 выполнены работы по направленному поинтервальному гидроразрыву на экспериментальном участке. Согласно схеме расположения скважин в конвейерном штреке 23-1-6, показанной на рисунке 2.5, гидроразрыв осуществлялся в двух скважинах глубиной 26 м.

При выполнении работ 10.03.2021 и 14.03.2021 оборудование для гидроразрыва (герметизаторы, регулирующий клапан, нагнетательные штанги) было дослано в забой скважины. Выполнена подача давления в систему и герметизация скважины по обе стороны от клапана.

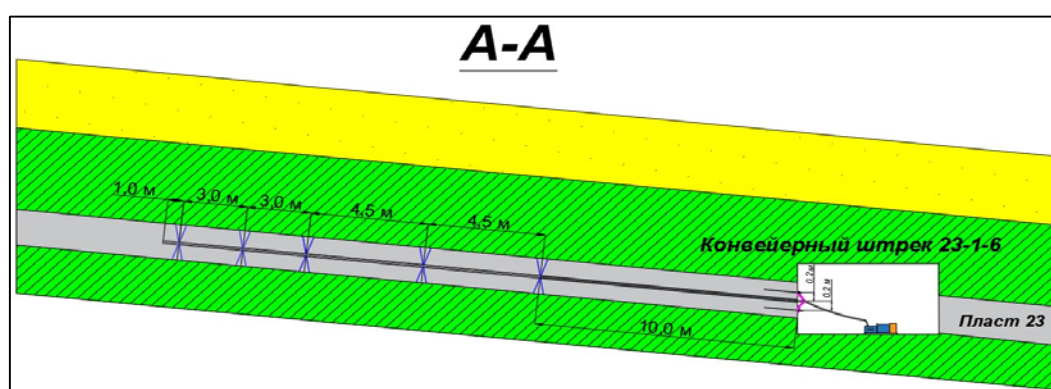
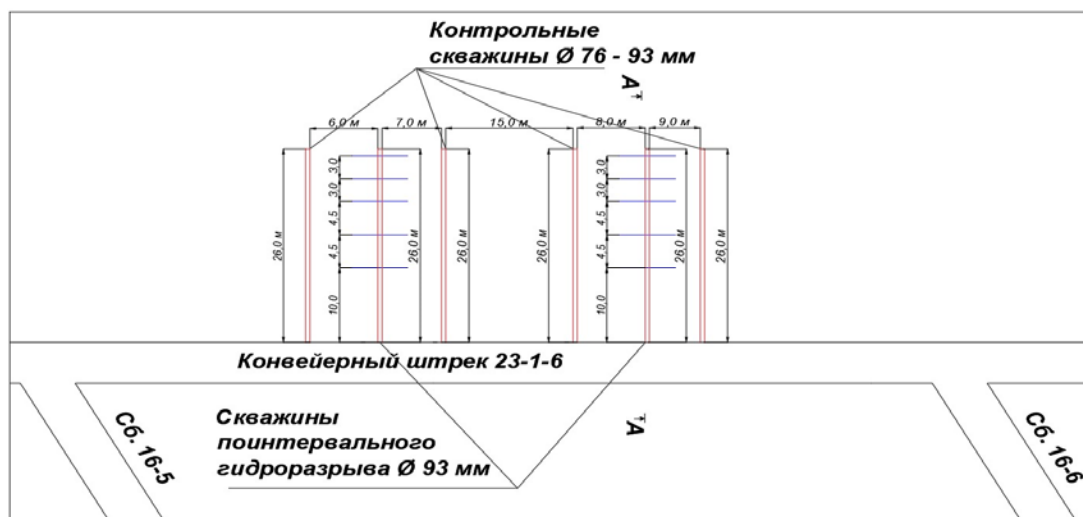


Рисунок 2.5 — Схема расположения скважин на опытном участке в конвейерном штрёке 23-1-6

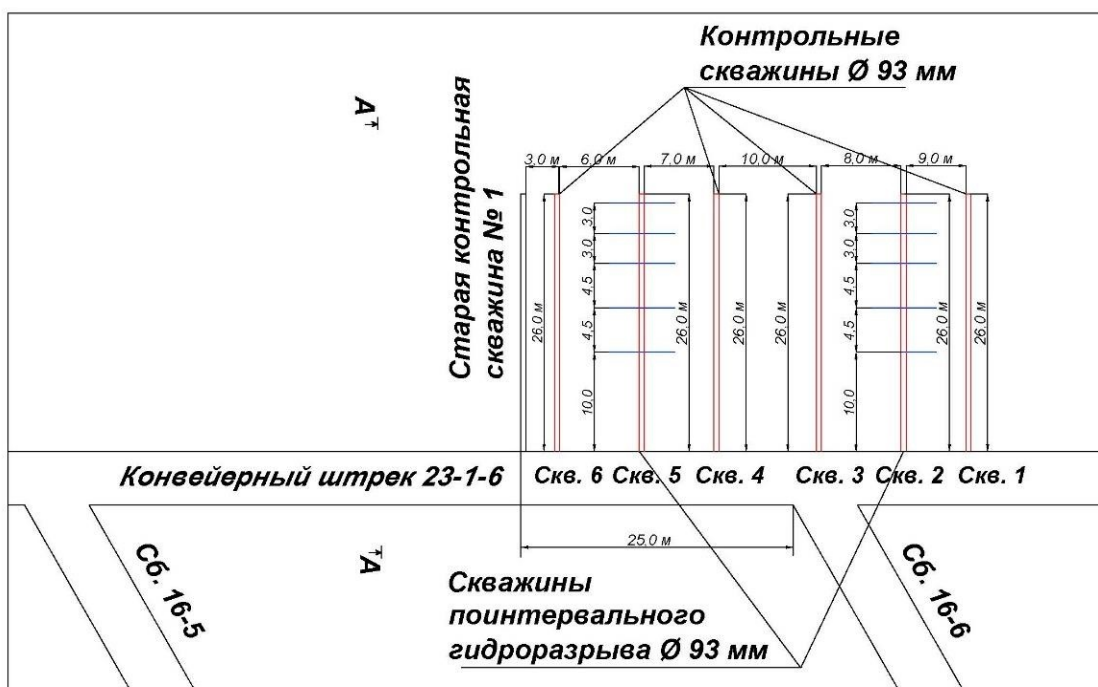


Рисунок 2.6 – Новая схема расположения скважин на опытном участке  
в конвейерном штрёке 23-1-6

После завершения процесса нагнетания и сброса давления из системы для перемещения разрывного устройства к следующему интервалу гидровоздействия герметизаторы заклинило в скважине.

Извлечь оборудование из скважин не удалось, таким образом в скважинах гидроразрыва осталось два полных комплекта оборудования для поинтервального гидроразрыва. Возможной причиной заклинивания оборудования в скважинах явились обвалившиеся стенки скважин.

После выполненных работ в двух скважинах гидроразрыва экспериментального участка было решено продолжить работы с исходными параметрами и схемой бурения скважин, но переместить фронт работ ближе к сбойке 16-6. Новая схема и места бурения скважин представлены на рисунке 2.6.

26.03.2021 работы по реализации поинтервального гидроразрыва пласта были продолжены на новом участке конвейерного штрэка 23-1-6.

Перед началом процесса нагнетания жидкости выполнены замеры концентрации метана  $\text{CH}_4$  на устье скважин гидроразрыва (скв. № 2 и 5).

Концентрация  $\text{CH}_4$  до гидроразрыва:

- Скв. № 5  $\text{CH}_4$  — 4–5 %.
- Скв. № 2  $\text{CH}_4$  — на устье скважины — 5,7 %, в скв. на глубине 40 см — 10 %.

Параметры выполнения поинтервального гидроразрыва при нагнетании жидкости в угольный пласт отражены в таблице 2.5.

После завершения процесса нагнетания жидкости выполнены замеры концентрации метана  $\text{CH}_4$  в контрольных скважинах, отбуренных на различных расстояниях от скважин гидроразрыва.

Концентрация  $\text{CH}_4$  в контрольных скважинах (скв. № 1, 3, 4, 6) после гидроразрыва составила 86,0–91,4 %.

При выполнении поинтервального гидроразрыва 26.03.2021 на опытном участке конвейерного штрэка 23-1-6 получены графики (рисунки 2.7–2.14), демонстрирующие процесс развития гидроразрыва на каждом интервале.

Таблица 2.5 — Параметры поинтервального гидроразрыва при нагнетании  
жидкости

№ скважины ГР	Расстояние от устья скв., м	Время зак., t, мин.	Объем зак., V, л	Давление, P, атм.	Примечание
5	24,5	5	240	200	Истечение воды из скважины после 5 мин. нагнетания
	21,5	3	130	220	Истечение воды из скважины после 3 мин. нагнетания
	17,0	3	60	220	Истечение воды из скважины после 3 мин. нагнетания
	12,5	40	1500	100–200	После сброса давления выбросило став из скважины, один из пакеров разорвало
2	18,0	10	200	150	Нагнетание через один пакер
	15,0	10	200	150	Нагнетание через один пакер
	10,5	15	163	100	Нагнетание остановлено после хлопка (в районе герметизатора) из скважины
	7,5	10	200	50	Нагнетание через один пакер

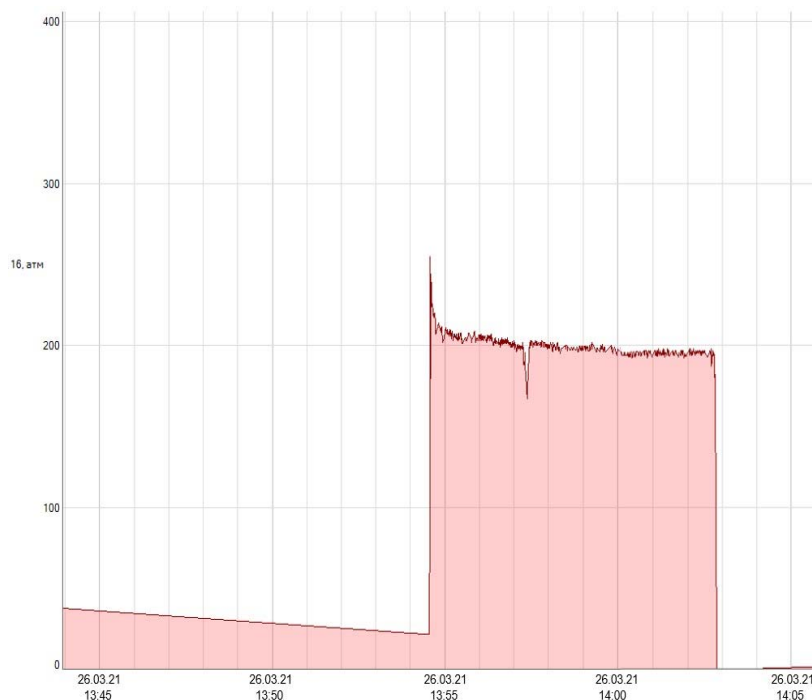


Рисунок 2.7 — Скважина гидроразрыва № 5. Интервал № 1.

Расстояние от устья скважины 24,5 м



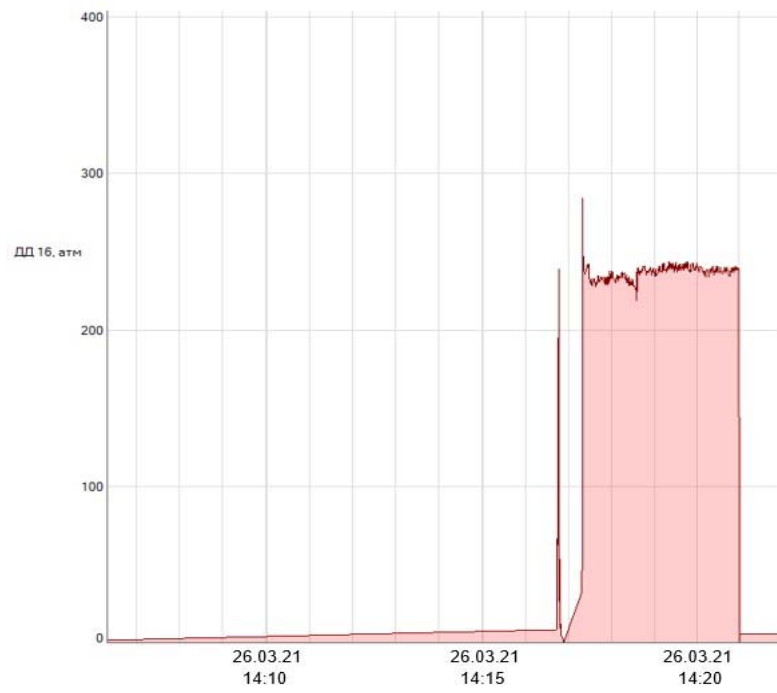


Рисунок 2.8 — Скважина гидроразрыва № 5. Интервал № 2.

Расстояние от устья скважины 21,5 м

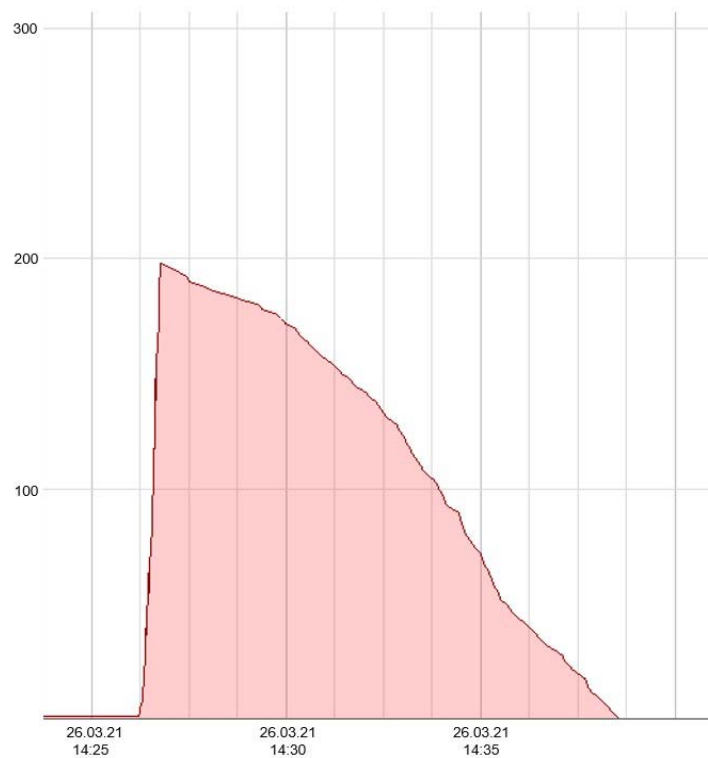


Рисунок 2.9 — Скважина гидроразрыва № 5. Интервал № 3.

Расстояние от устья скважины 17,0 м

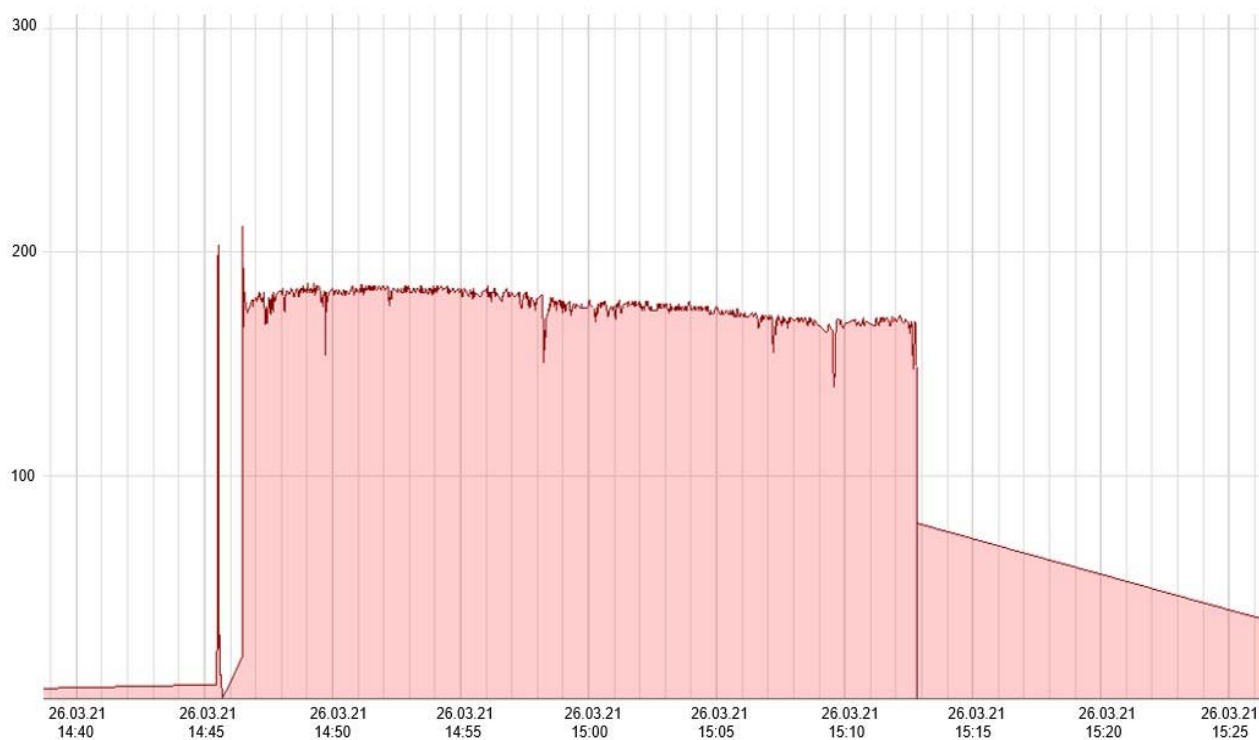


Рисунок 2.10 — Скважина гидроразрыва № 5. Интервал № 4.

Расстояние от устья скважины 12,5 м



Рисунок 2.11 — Скважина гидроразрыва № 2. Интервал № 1.

Расстояние от устья скважины 18,0 м

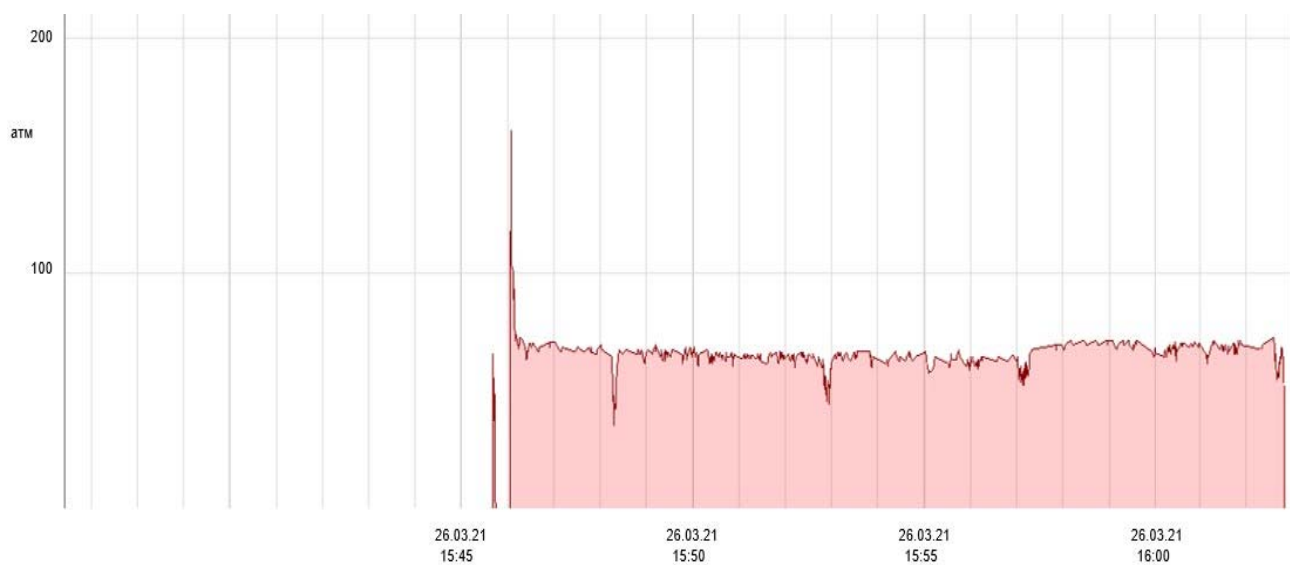


Рисунок 2.12 — Скважина гидроразрыва № 2. Интервал № 2.

Расстояние от устья скважины 15,0 м

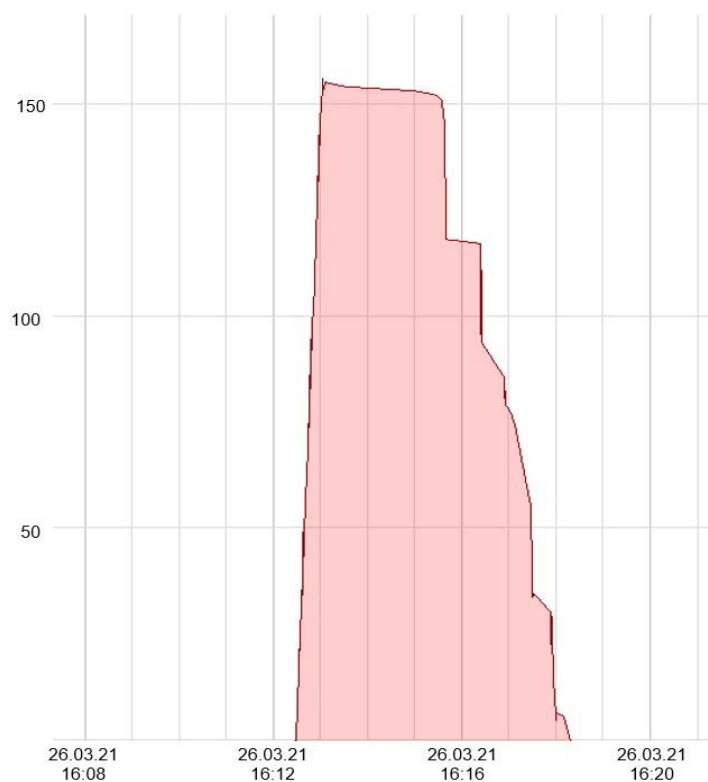


Рисунок 2.13 — Скважина гидроразрыва № 2. Интервал № 3.

Расстояние от устья скважины 10,5 м

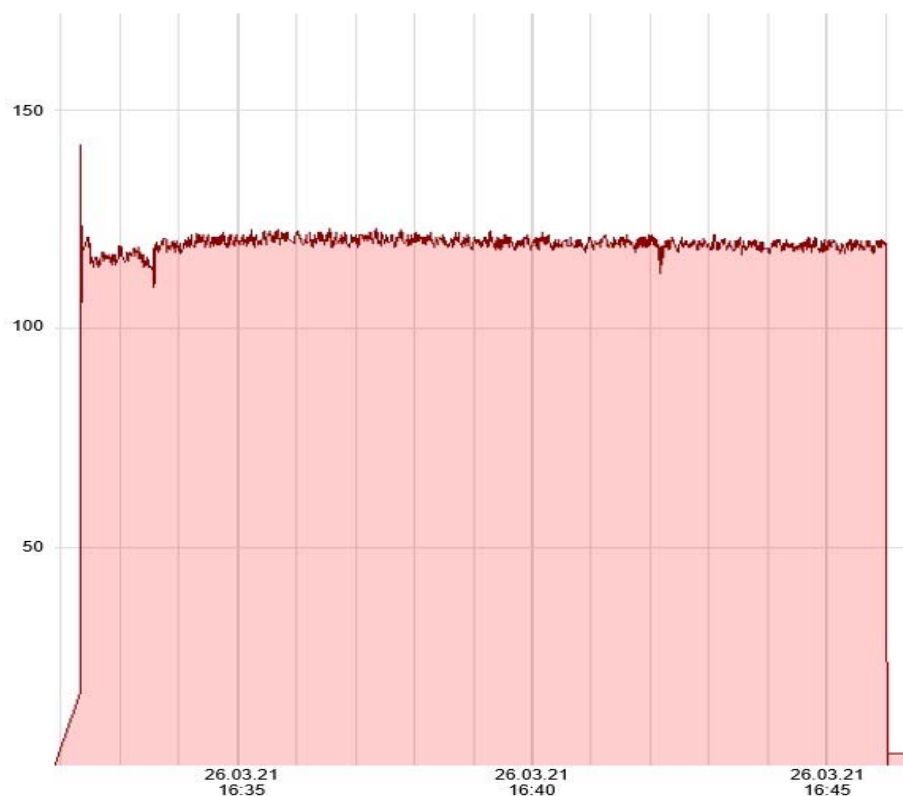


Рисунок 2.14 — Скважина гидроразрыва № 2. Интервал № 4.  
Расстояние от устья скважины 7,5 м

## 2.5 Контроль эффективности гидроразрыва

Для определения объема каптированного газа необходимо ежедневно контролировать дебит и концентрацию метана, разрежение на стороне всасывания смеси и давление на нагнетательном газопроводе [81].

В инструкции [81] описан весь порядок выполнения замеров каптированного газа, которому следовали при выполнении контроля эффективности гидроразрыва.

В случае выявления параметров дегазации, не отвечающих проектным, необходимо принять меры по обнаружению причин недостаточной эффективности дегазации. Одним из методов выявления причин является проведение вакуумно-газовой съемки в дегазационном газопроводе.

### *Мониторинг концентрации и дебита $CH_4$ из скважин*

С момента отбуривания контрольных и гидроразрывных скважин 22.03.2021 на экспериментальном участке выполнялся мониторинг концентрации и дебита  $CH_4$  из

скважин в период с 22.03.2021 по 14.04.2021 (рисунки 2.15–2.20 и таблицы 2.6 и 2.7).

Таблица 2.6 — Мониторинг концентрации и дебита  $\text{CH}_4$  из скважин

	Номер скв.	22.03	23.03	24.03	25.03	ИТОГО $V_{\text{капт. газа}}$ до ГР, $\text{м}^3$	27.03	28.03	29.03	30.03
Уч-к 1	1	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	—	0,0985	0,1316	0,0658	0,0000
	2	0,0423	0,0423	0,0423	0,0423	—	0,0048	0,0051	0,0254	0,0458
	3	0,0204	0,0204	0,0204	0,0204	—	0,0328	0,0360	0,0328	0,0295
Всего дебит, $\text{м}^3/\text{сут.}$		97,17	97,17	97,17	97,17	—	195,85	248,77	178,60	108,44
$V$ кап. газа, $\text{м}^3$		97,17	194,34	291,51	388,69	<b>388,69</b>	293,03	541,80	720,40	<b>828,84</b>
Ост. газоносность, $\text{м}^3/\text{т}$		21,72	21,44	21,16	20,87	—	20,02	19,30	18,79	18,47
Уч-к 2	4	0,0165	0,0165	0,0165	0,0165	—	0,0411	0,0448	0,0285	0,0122
	5	0,0166	0,0166	0,0166	0,0166	—	0,0036	0,0038	0,0098	0,0158
	6	0,0082	0,0082	0,0082	0,0082	—	0,0069	0,0080	0,0074	0,0068
Всего дебит, $\text{м}^3/\text{сут}$		59,52	59,52	59,52	59,52	—	74,31	81,55	65,86	50,17
$V$ кап. газа, $\text{м}^3$		59,52	119,05	178,57	238,10	<b>238,10</b>	133,84	215,39	281,25	<b>331,42</b>
Ост. газоносность, $\text{м}^3/\text{т}$		21,80	21,61	21,41	21,21	—	20,77	20,50	20,28	20,11

Как видно из таблицы 2.6, в период с 22.03.2021 по 25.03.2021 включительно, т. е. за 4 суток до выполнения поинтервального гидроразрыва в скважинах, объем каптированного газа из скважин № 1–3 (участок 1) составил 388,69  $\text{м}^3$ , из скважин № 4–6 (участок 2) — 238,1  $\text{м}^3$ . За аналогичный период после поинтервального гидроразрыва объем каптированного газа из скважин № 1–3 (участок 1) составил 828,84  $\text{м}^3$ , из скважин № 4–6 (участок 2) — 331,42  $\text{м}^3$ .

Из вышесказанного следует, что после выполнения поинтервального гидроразрыва дебит  $\text{CH}_4$  из скважин № 1–3 (участок 1) увеличился в 2,1 раза, из скважин № 4–6 (участок 2) увеличился в 1,4 раза.

Таблица 2.7 — Мониторинг концентрации и дебита СН<sub>4</sub> из скважин в период с 22.03.2021 по 14.04.2021

Номер скв.	22.03.21 Бур. свх.	23.03.21	24.03.21	25.03.21	ИТОГО кап. по ГР, м³	26.03.21 ГР	27.03.21	28.03.21	29.03.21	30.03.21	31.03.21	01.04.21	02.04.21	03.04.21	04.04.21	05.04.21	06.04.21	07.04.21	08.04.21	09.04.21	10.04.21	11.04.21	12.04.21	13.04.21	14.04.21	V кап. газа из скв., м³
1	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0085	0,1316	0,1509	0,1702	0,1702	0,1702	0,1530	0,1538	0,1019	0,1019	0,0680	0,0380	0,0249	0,0249	0,0119	0,0199	0,0279	0,0143	0,0007	2,339
Уч-к 1	2	0,0423	0,0423	0,0423	0,0423	0,0423	0,0048	0,0051	0,0405	0,0759	0,0759	0,0759	0,0717	0,0676	0,1297	0,1297	0,1918	0,1002	0,0582	0,0582	0,0162	0,0552	0,0943	0,0520	0,0098	2,195
3	0,0204	0,0204	0,0204	0,0204	0,0204	0,0204	0,0328	0,0360	0,0265	0,0169	0,0169	0,0169	0,0136	0,0103	0,0741	0,0741	0,1378	0,1378	0,0734	0,0734	0,0089	0,0260	0,0431	0,0350	0,0269	1,415
Всего дебит, м³/сут	97,17	97,17	97,17	97,17	97,17	97,17	195,85	248,77	313,67	378,56	378,56	378,56	343,20	307,83	440,23	440,23	572,63	397,30	225,35	225,35	53,20	145,57	237,94	145,91	53,87	
V кап. газа, м³	97,17	97,17	97,17	97,17	97,17	97,17	293,03	341,80	855,46	1,234,03	1,612,59	1,991,16	2,334,36	2,642,19	3,082,42	3,522,65	4,095,28	4,492,77	4,718,12	4,943,47	4,996,68	5,142,25	5,380,19	5,526,10	5,579,97	
Ост-я газоносность, м³/т	21,72	21,44	21,44	21,16	20,87	20,59	20,02	19,30	18,39	17,30	16,20	15,10	14,11	13,21	11,94	10,66	9,00	7,85	7,20	6,54	6,39	5,97	5,28	4,86	4,70	
Уч-к 2	4	0,0165	0,0165	0,0165	0,0165	0,0165	0,0411	0,0448	0,0342	0,0235	0,0235	0,0235	0,0255	0,0274	0,0190	0,0190	0,0106	0,0109	0,0168	0,0168	0,0227	0,0145	0,0063	0,0156	0,0230	725
5	0,0166	0,0166	0,0166	0,0166	0,0166	0,0166	0,0036	0,0038	0,0379	0,0719	0,0719	0,0719	0,0668	0,0616	0,0559	0,0559	0,0501	0,0451	0,0352	0,0352	0,0252	0,0401	0,0550	0,0524	0,0497	1,400
6	0,0082	0,0082	0,0082	0,0082	0,0082	0,0082	0,0069	0,0080	0,0060	0,0040	0,0040	0,0040	0,0033	0,0026	0,0076	0,0076	0,0125	0,0068	0,0099	0,0099	0,0129	0,0103	0,0076	0,0113	0,0130	276
Всего дебит, м³/сут	59,52	59,52	59,52	59,52	59,52	59,52	74,31	81,55	112,41	145,28	145,28	145,28	137,60	131,92	118,73	118,73	105,54	90,48	89,06	89,06	87,64	93,44	99,24	114,21	129,18	
V кап. газа, м³	59,52	59,52	59,52	59,52	59,52	59,52	133,84	215,39	327,80	471,08	614,36	757,64	895,23	1,027,15	1,145,87	1,264,60	1,370,14	1,460,62	1,549,68	1,638,74	1,726,38	1,819,82	1,919,06	2,033,26	2,162,44	
Ост-я газоносность, м³/т	21,80	21,61	21,61	21,41	21,21	21,01	20,77	20,50	20,12	19,65	19,17	18,70	18,24	17,80	17,41	17,02	16,67	16,37	16,07	15,77	15,48	15,17	14,85	14,47	14,04	

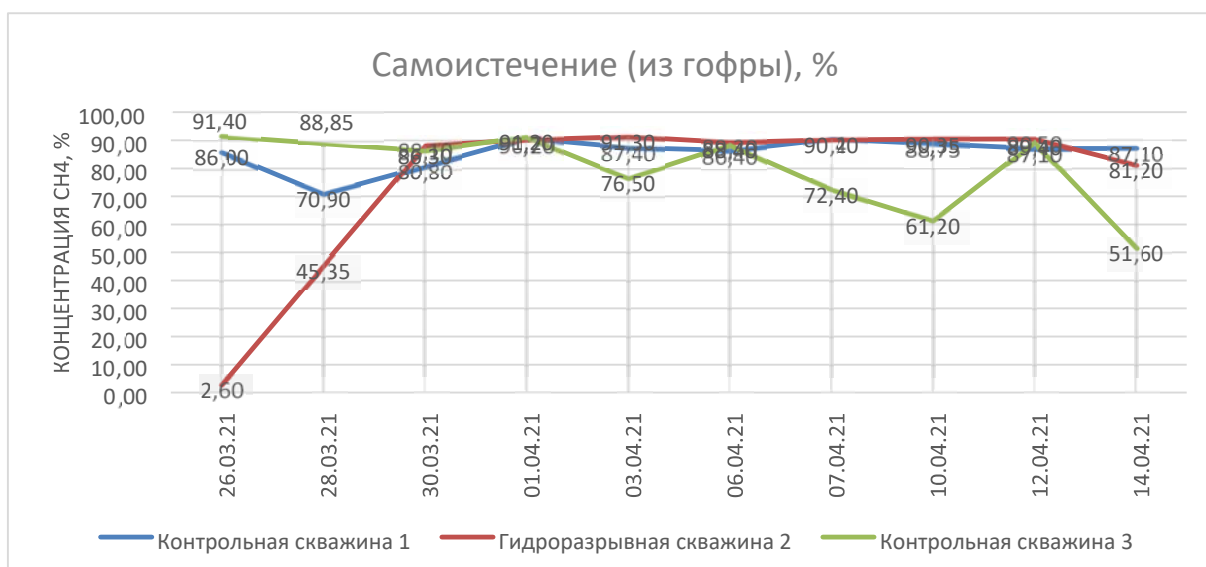


Рисунок 2.15 — График изменения концентрации СН<sub>4</sub> на устьях скважин

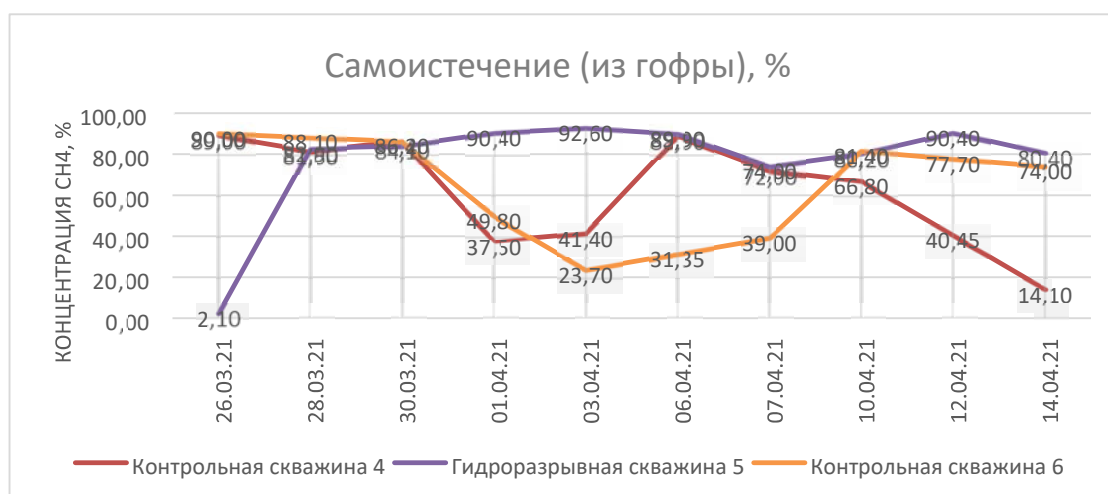


Рисунок 2.16 — График изменения концентрации СН<sub>4</sub> на устьях скважин

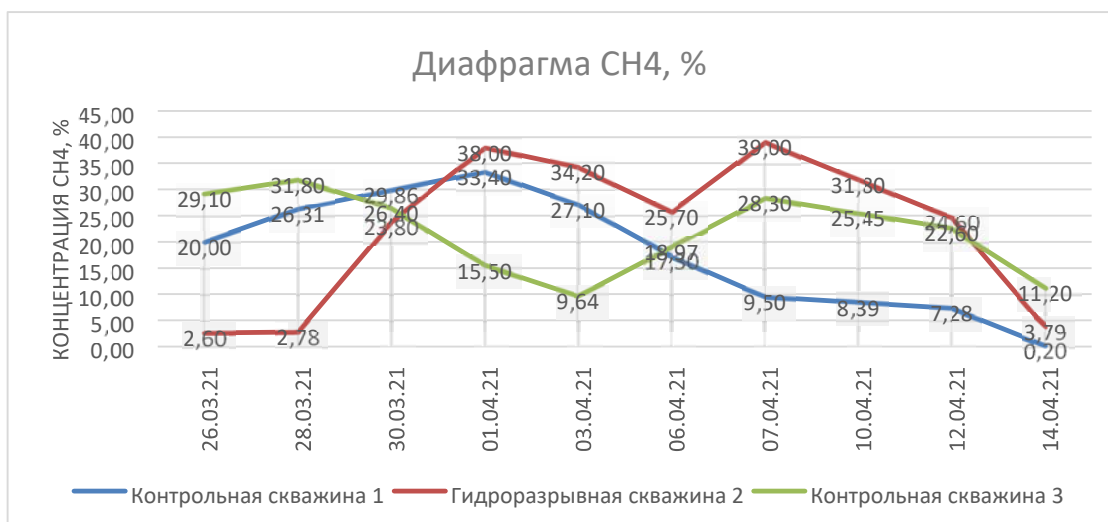


Рисунок 2.17 — График изменения концентрации СН<sub>4</sub> на диафрагме скважин



Рисунок 2.18 — График изменения концентрации СН<sub>4</sub> на диафрагме скважин

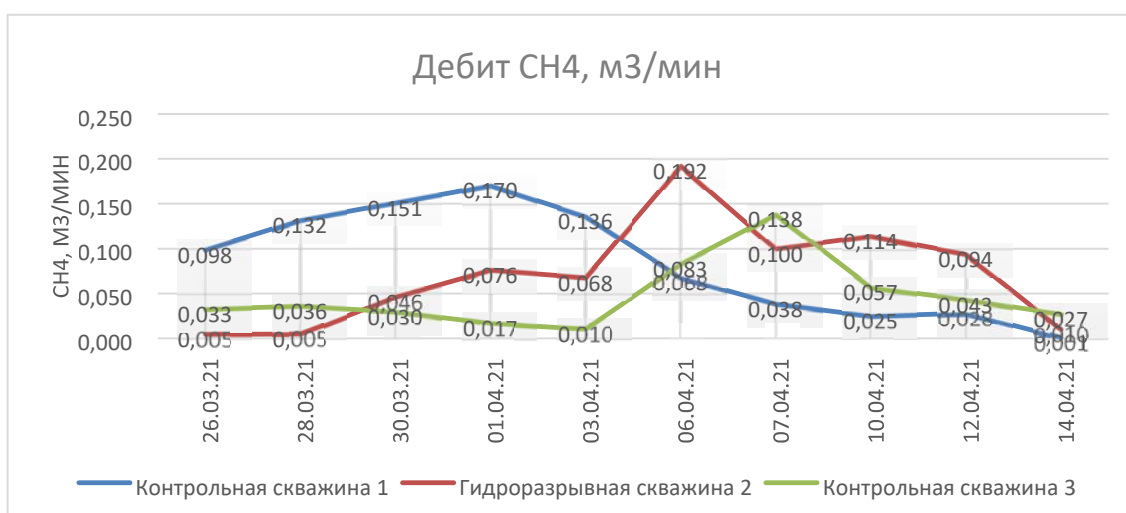


Рисунок 2.19 — График изменения дебита СН<sub>4</sub> из скважин

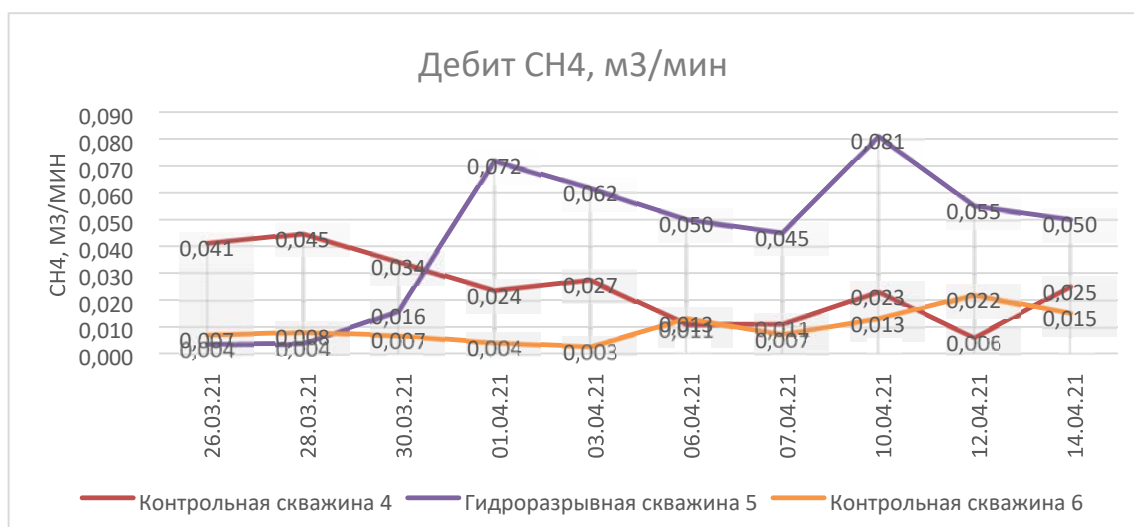


Рисунок 2.20 — График изменения дебита СН<sub>4</sub> из скважин



Согласно Инструкции по контролю состава рудничного воздуха, определению газообильности и установлению категорий шахт по метану и диоксиду углерода, при значениях газоносности не более  $15 \text{ м}^3/\text{т}$  пласт относится к III категории по газу. Целью выполнения научно-исследовательской работы по испытанию поинтервального гидровоздействия для дегазации пласта из подготовительного забоя в условиях ООО «Шахта им. С. Д. Тихова» является снижение газоносности до величин, соответствующих III категории шахт по газу и ниже, обеспечивающей безопасное проведение выработок.

Время снижения газоносности до значения  $15 \text{ м}^3/\text{т}$  зависит от количества газа, который необходимо каптировать из массива. Расчет количества газа произведен на основе данных поинтервального гидровоздействия, выполненного на экспериментальном участке в конвейерном штреке 23-1-6.

Границы зоны воздействия поинтервального гидроразрыва определяются мощностью пласта и параметрами скважин гидроразрыва (рисунок 2.21).

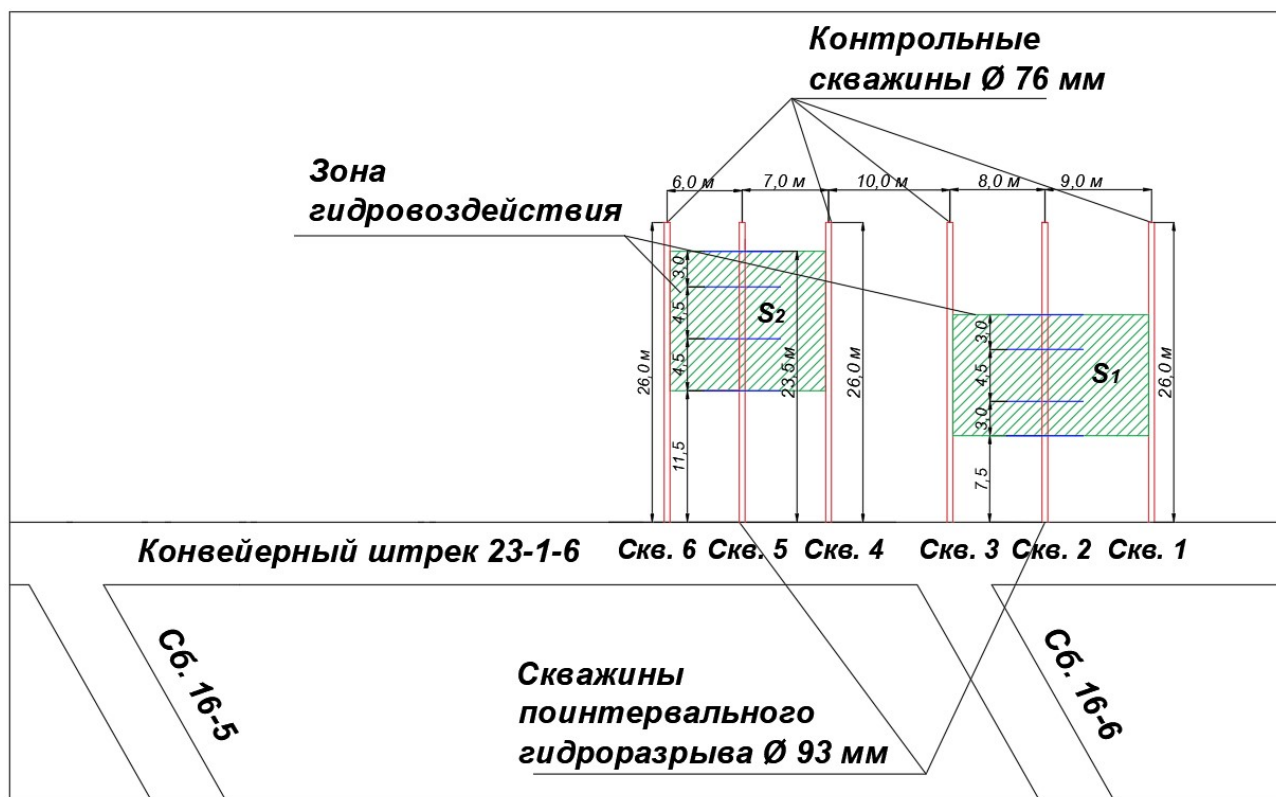


Рисунок 2.21 — Границы зоны воздействия поинтервального гидроразрыва

Исходные данные для расчета:

природная газоносность пласта —  $22 \text{ м}^3/\text{т}$ ;

мощность пласта 23 —  $1,51 \text{ м}$ ;

удельный вес угля —  $1,28 \text{ т}/\text{м}^3$ .

Количество угля  $T_y$ , т, в зоне скважины гидроразрыва вычисляется по формуле:

$$T_y = S_n \cdot m \cdot x, \quad (2.6)$$

где  $S_1, S_2 \text{ м}^3/\text{т}$  с.б.м. площадь гидровоздействия из скважин № 2 и 5 соответственно,  $\text{м}^2$ ;

$m$  — мощность пласта, м;

$x$  — удельный вес угля,  $\text{т}/\text{м}^3$ .

$$S_1 = 10,5 \cdot 17,0 = 178,5 \text{ м}^2; \quad (2.7)$$

$$S_2 = 12,0 \cdot 13,0 = 156,0 \text{ м}^2; \quad (2.8)$$

$$T_{y1} = 178,5 \cdot 1,51 \cdot 1,28 = 345,0 \text{ т}; \quad (2.9)$$

$$T_{y2} = 156,0 \cdot 1,51 \cdot 1,28 = 301,5 \text{ т}. \quad (2.10)$$

Тогда объем газа  $V_{\text{газа}}$ , который содержится в  $T_y$ , равен:

$$V_{\text{газа}} = T_y \cdot g_{\text{природ}}, \quad (2.11)$$

где  $g_{\text{природ}}$  — природная газоносность,  $\text{м}^3/\text{т}$  с.б.м.

$$V_{\text{газа}1} = 345 \text{ т} \cdot 22 \text{ м}^3/\text{т} = 7590 \text{ м}^3, \quad (2.12)$$

$$V_{\text{газа}2} = 301,5 \text{ т} \cdot 22 \frac{\text{м}^3}{\text{т}} = 6633 \text{ м}^3. \quad (2.13)$$

Объем газа  $V_{\text{ост. газа}}$  при газоносности  $15 \text{ м}^3/\text{т}$  с.б.м. равен:

$$V_{\text{ост. газа}} = T_y \cdot g_{\text{ост}}, \quad (2.14)$$

где  $g_{\text{ост}}$  — остаточная газоносность,  $\text{м}^3/\text{т}$ .

$$V_{\text{ост. газа}1} = 345 \text{ т} \cdot 15 \text{ м}^3/\text{т} = 5175 \text{ м}^3, \quad (2.15)$$

$$V_{\text{ост. газа}2} = 301,5 \text{ т} \cdot 15 \text{ м}^3/\text{т} = 4522,5 \text{ м}^3. \quad (2.16)$$

Для снижения газоносности до значения  $15 \text{ м}^3/\text{т}$  объем каптированного газа  $V_{\text{кап. газа}}$  составит:

$$V_{\text{кап. газа}} = V_{\text{газа}} - V_{\text{ост. газа}}; \quad (2.17)$$

$$V_{\text{кап. газа1}} = 7590 - 5175 = 2415 \text{ м}^3; \quad (2.18)$$

$$V_{\text{кап. газа2}} = 6633 - 4522,5 = 2110,5 \text{ м}^3. \quad (2.19)$$

Результаты исследования параметров поинтервального гидровоздействия на экспериментальном участке конвейерного штрека 23-1-6 пласта 23 в условиях ООО «Шахта им. С. Д. Тихова» позволили сделать ряд выводов:

1. Наибольший эффект по объему каптируемого газа в период с 26.03.2021 по 14.04.2021 показала контрольная скважина № 1, находящаяся на расстоянии 9 м от скважины гидроразрыва № 2.

2. Объем каптируемого газа из контрольной скважины № 1 в период с 26.03.2021 по 14.04.2021 составил  $2359 \text{ м}^3$ .

3. Объем каптируемого газа в период с 26.03.2021 по 14.04.2021 с участка 1 (скважины № 1–3) составил  $5579 \text{ м}^3$ , с участка 2 (скважины № 4–6) составил  $2162 \text{ м}^3$ .

4. Общий объем каптируемого газа из всех скважин экспериментального участка в период с 26.03.2021 по 14.04.2021 составил  $7741 \text{ м}^3$ .

5. Для снижения газоносности до значения  $15 \text{ м}^3/\text{т}$  необходимый объем каптированного газа составит для участка 1 —  $V_{\text{кап. газа1}} = 2415 \text{ м}^3$ , для участка 2 —  $V_{\text{кап. газа2}} = 2110,5 \text{ м}^3$  за 7 и 18 сут. соответственно.

6. По результатам исследования параметров поинтервального гидровоздействия на экспериментальном участке в условиях ООО «Шахта им. С. Д. Тихова» установлено расстояние от скважины гидроразрыва до скважины барьерной дегазации, равное до 8–9 м.

7. Требуемый объем закачиваемой жидкости в интервал  $V_{\text{зак.}} = 200\text{--}300 \text{ л}$ , время нагнетания  $t_{\text{зак.}} = 4\text{--}10 \text{ мин}$ .

8. Общий объем закачиваемой жидкости на одну скважину поинтервального гидроразрыва составил: для скважины № 2  $Q_{\text{ж}} = 0,763 \text{ м}^3$ , для скважины № 5  $Q_{\text{ж}} = 1,93 \text{ м}^3$ .

9. Максимальное давление рабочей жидкости для проведения гидроразрыва пласта достигало  $P_{\text{наг. max}} = 22\text{--}28$  МПа.

## 2.6 Результаты экспериментов поинтервального гидровоздействия в конвейерном штреке, путевом уклоне и наклонном вентиляционном стволе

Полученные выше результаты позволили перейти к экспериментам в подготовительном забое.

Фактическая схема бурения скважин для поинтервального гидровоздействия и барьерной дегазации пласта в подготовительном забое конвейерного штрека 23-1-7 представлена на рисунке 2.22.

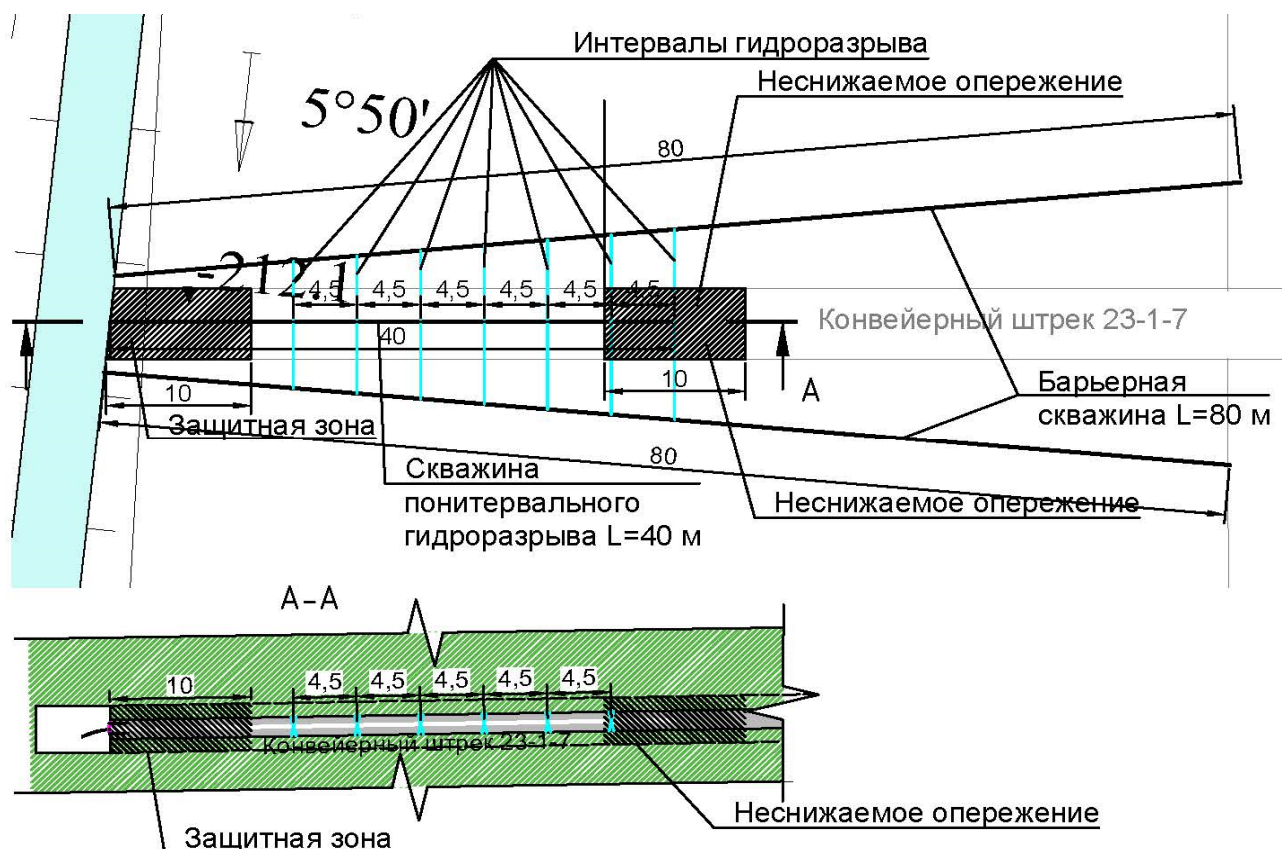


Рисунок 2.22 — Схема бурения скважины для поинтервального гидроразрыва в подготовительном забое конвейерного штрека 23-1-7

Длина передовой скважины поинтервального гидровоздействия составила  $L = 40$  м, диаметр скважины 93 мм.

Передовая скважина поинтервального гидровоздействия была отбурена по оси конвейерного штрека 23-1-7 в центр угольного пласта по мощности.

Поинтервальное гидровоздействие производилось обратным ходом, от забоя скважины к устью. Участок скважины на глубину 10 м от устья не обрабатывался, т. к. является защитной зоной.

Перед началом процесса нагнетания жидкости выполнен замер концентрации метана  $\text{CH}_4$  на устье скважины поинтервального гидровоздействия и на двух ближайших к забою скважинах барьерной дегазации.

Концентрация  $\text{CH}_4$  до гидровоздействия:

- передовая скважина гидровоздействия  $\text{CH}_4$  — 98,0 %;
- барьерная скв. № 1 (левая)  $\text{CH}_4$  — 26,0 %;
- барьерная скв. № 2 (правая)  $\text{CH}_4$  — 57,8 %.

Параметры выполнения поинтервального гидровоздействия при нагнетании жидкости в угольный пласт отражены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 — Параметры поинтервального гидровоздействия при нагнетании жидкости в КШ 23-1-7

Расстояние от устья скв., м	Время зак., т, мин.	Объем зак., V, л	Давление, P, атм.	Примечание
28,0	15	240	120	Истечение воды из скважины после 5 мин. нагнетания
23,5	5	110	100	Истечение воды из скважины после 3 мин. нагнетания
19,0	5	90	100	Истечение воды из скважины после 2 мин. нагнетания
14,5	5	700	100	Площадное нагнетание жидкости в скважину

После завершения процесса нагнетания жидкости выполнены замеры концентрации метана  $\text{CH}_4$  под вакуумом в барьерных скважинах и на устье скважины поинтервального гидровоздействия.

Сравнительная таблица замеров концентрации метана  $\text{CH}_4$  в скважинах представлена в таблице 2.9.

В процессе проведения поинтервального гидровоздействия датчиком 1 производилась запись изменения давления. Графики давления представлены на рисунках 38–41.

Таблица 2.9 — Сравнительная таблица замеров концентрации метана  $\text{CH}_4$  в скважинах конвейерного штрека 23-1-7

Наименование скважины	Концентрация $\text{CH}_4$ , %		
	До ПГВ 01.08.2021	После ПГВ 01.08.2021	02.08.2021
Передовая скв. ПГВ	47,7	90,9	–
Барьерная скв. № 1 (левая)	26,0	52,5	67,0
Барьерная скв. № 2 (правая)	57,8	43,1	10,0

В таблице 2.10 представлены результаты прогноза выбросоопасности пласта 23 при проведении конвейерного штрека 23-1-7.

Фактическая схема бурения скважин для поинтервального гидровоздействия и барьерной дегазации пласта в подготовительном забое путевого уклона № 1 представлена на рисунке 2.27.

Длина передовой скважины поинтервального гидровоздействия составила 40 м, диаметр скважины 93 мм.

Передовая скважина поинтервального гидровоздействия была отбурена по оси выработки в центр угольного пласта по мощности.

Поинтервальное гидровоздействие производилось обратным ходом, от забоя скважины к устью. Участок скважины на глубину 15 м от устья не обрабатывался, т. к. является защитной зоной.

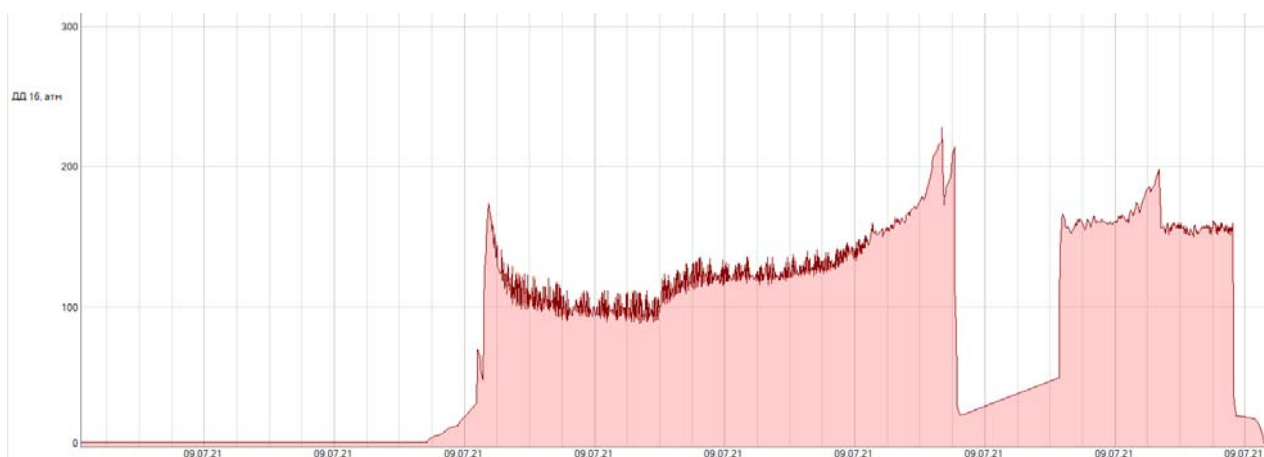


Рисунок 2.23 — График изменения давления на интервале № 1

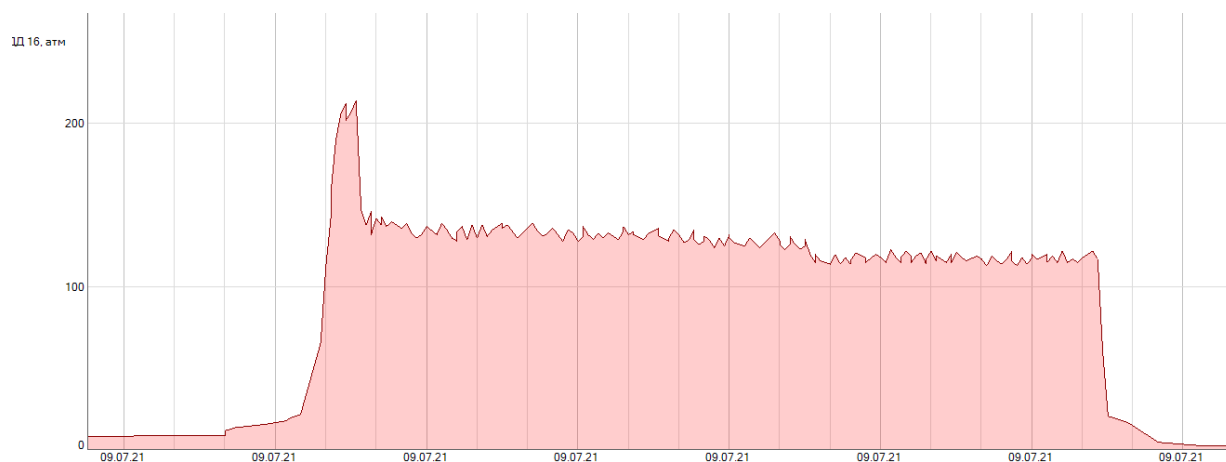


Рисунок 2.24 — График изменения давления на интервале № 2

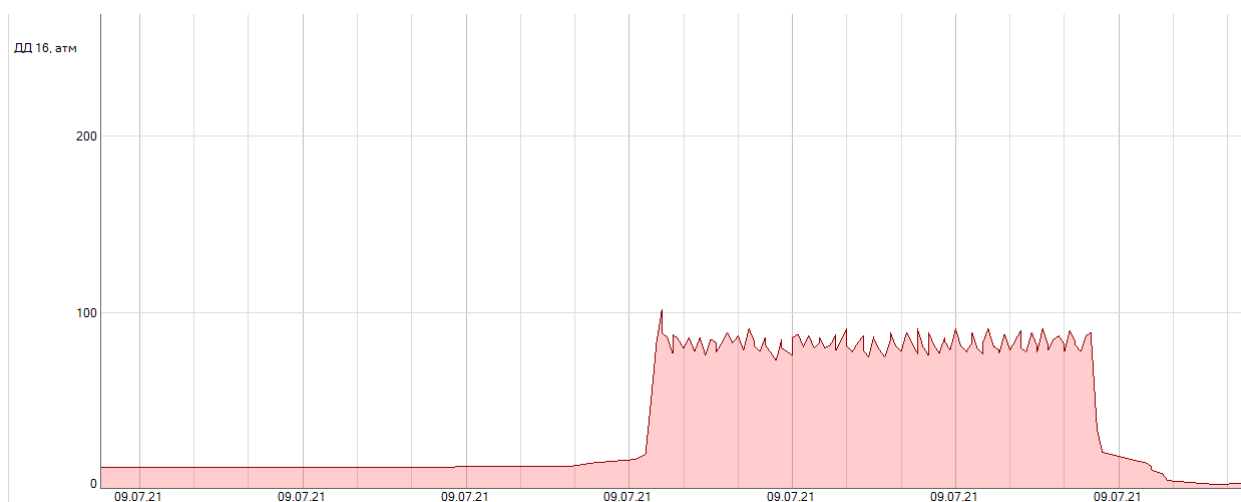


Рисунок 2.25 — График изменения давления на интервале № 3

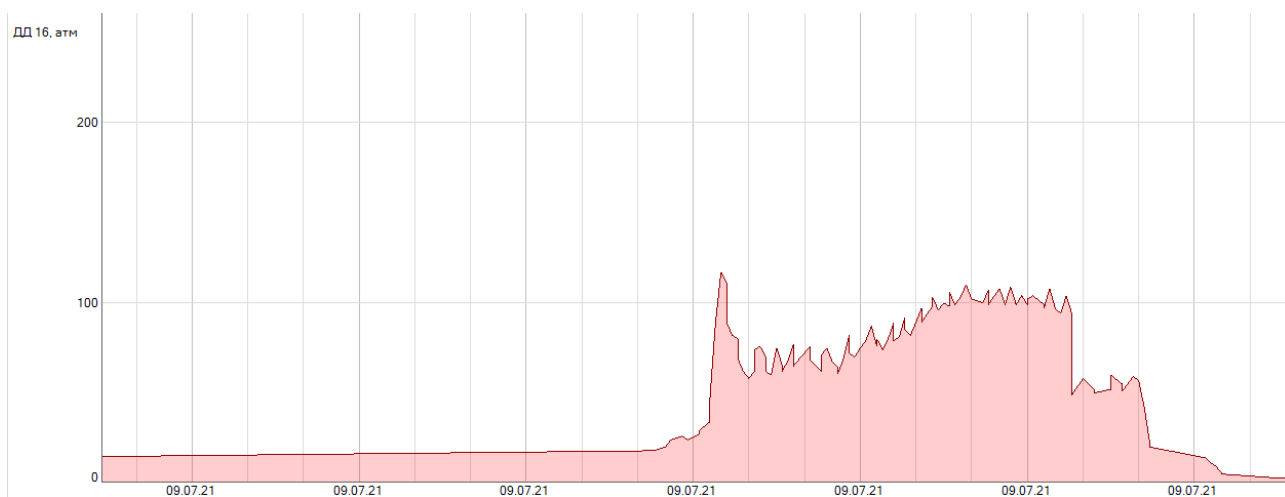


Рисунок 2.26 — График изменения давления на интервале № 4

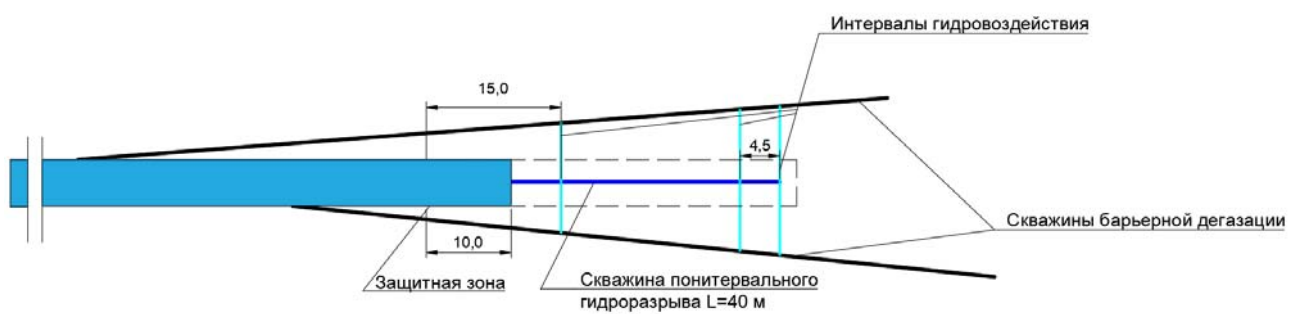


Рисунок 2.27 — Схема бурения скважины для поинтервального гидроразрыва в подготовительном забое путевого уклона № 1



Таблица 2.10 — Результаты прогноза выбороопасности пласта 23 при проведении КШ 23-1-7

	09.07	10.07	11.07	12.07	13.07	14.07	15.07	16.07	17.07	18.07	19.07	20.07	21.07	22.07	23.07	24.07	25.07	26.07	27.07
Проведение за сутки, п. м	0	4	3	1	3	1	4	1	1	6	3		5			4	4		
Проведение за месяц, п. м	0	0	4	7	8	11	12	16	17	18	24	27	27	32	32	32	36	40	40
Текущий прогноз опасно/не опасно	<del>НД</del> опасно	–	Не опасно	<del>Опасно</del> но	–	Не опасно	<del>Опасно</del> но	Не опасно	Не опасно	Не опасно			Не опасно			Не опасно	Опасно		
Значение (л/мин)	1,4/1,2		1,4/2,0	2,7/4,1		2,0/1,4	4,6/1,3		2,0/2,3	3,0/2,8		2,1/1,5	3,7/2,9		2,0/1,0	1,7/1,4	3,5/4,5		
Барьерная скважина правая (самостоятельное), %					0,4 %	0,85 %	0,12 %	0,1 %	0,12 %	0,15 %	0,10 %	0,41 %	0,30 %	0,43 %	0,28 %	0,59 %	0,47 %	0,30 %	0,33 %
Барьерная скважина левая (самостоятельное), %					4,97 %	4,82 %	4,59 %	1,62 %	0,11 %	0,27 %	0,30 %	0,60 %	0,15 %	0,20 %	0,18 %	0,14 %	0,32 %	0,28 %	0,20 %
Барьерная скважина левая (под разряжением), %					1,63 %	3,56 %	1,52 %	3,93 %	0,54 %	0,32 %	0,50 %	0,36 %	0,48 %	0,55 %	0,42 %	0,6 %	0,73 %	0,64 %	0,58 %
Барьерная скважина правая (под разряжением), %					0,40 %	0,69 %	0,10 %	0,28 %	0,14 %	0,18 %	0,20 %	0,52 %	0,21 %	0,18 %	0,22 %	0,11 %	0,17 %	0,15 %	0,10 %
Разряжение в левой барьерной скважине (мм.рт. ст.)					25,65	25,5	24,3	26,32	25,12	14,85	17,25	15,1	15	17	15,5	16	20	25	27
Разряжение в правой барьерной скважине (мм.рт. ст.)					25,43	23,1	15,68	8,85	21	13,2	16,65	17,27	23	25,43	22,21	19,63	18,43	24	26
Контроль эффективности опасно/не опасно	Не опасно				Не опасно			Не опасно			Не опасно				Опасно				
Значение(л/мин)		0,5/0,8			2,9/1,2			0,9/1,2			1,3/2,7				6,9/3,1				

Перед началом процесса нагнетания жидкости выполнен замер концентрации метана  $\text{CH}_4$  на устье скважины поинтервального гидровоздействия и на двух ближайших к забою скважинах барьерной дегазации.

Концентрация  $\text{CH}_4$  до гидровоздействия:

- барьерная скв. № 1 (левая)  $\text{CH}_4$  — 44,6 %;
- барьерная скв. № 2 (правая)  $\text{CH}_4$  — 24,8 %.

Параметры выполнения поинтервального гидровоздействия при нагнетании жидкости в угольный пласт отражены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 — Параметры поинтервального гидровоздействия при нагнетании жидкости в ПУ № 1

Расстояние от устья скв., м	Время зак., t, мин.	Объем зак., V, л	Давление, P, атм.	Примечание
40,0	2	60	80	Истечение воды из скважины
37,0	2	60	60	Истечение воды из скважины, порыв герметизатора
15,0	52	894	50	

После завершения процесса нагнетания жидкости выполнены замеры концентрации метана  $\text{CH}_4$  под вакуумом в барьерных скважинах и на устье скважины поинтервального гидровоздействия.

Сравнительная таблица замеров концентрации метана  $\text{CH}_4$  в скважинах представлена в таблице 2.12.

Таблица 2.12 — Сравнительная таблица замеров концентрации метана  $\text{CH}_4$  в скважинах путевого уклона № 1

Наименование скважины	До ПГВ 16.11.2021	После ПГВ 16.11.2021
Передовая скв. ПГВ	47,7	90,9
Барьерная скв. № 1 (левая)	44,6	49,9
Барьерная скв. № 2 (правая)	24,8	25,0

В процессе проведения поинтервального гидровоздействия датчиком ДДР производилась запись изменения давления. Графики давления представлены на рисунках 2.28–2.30.

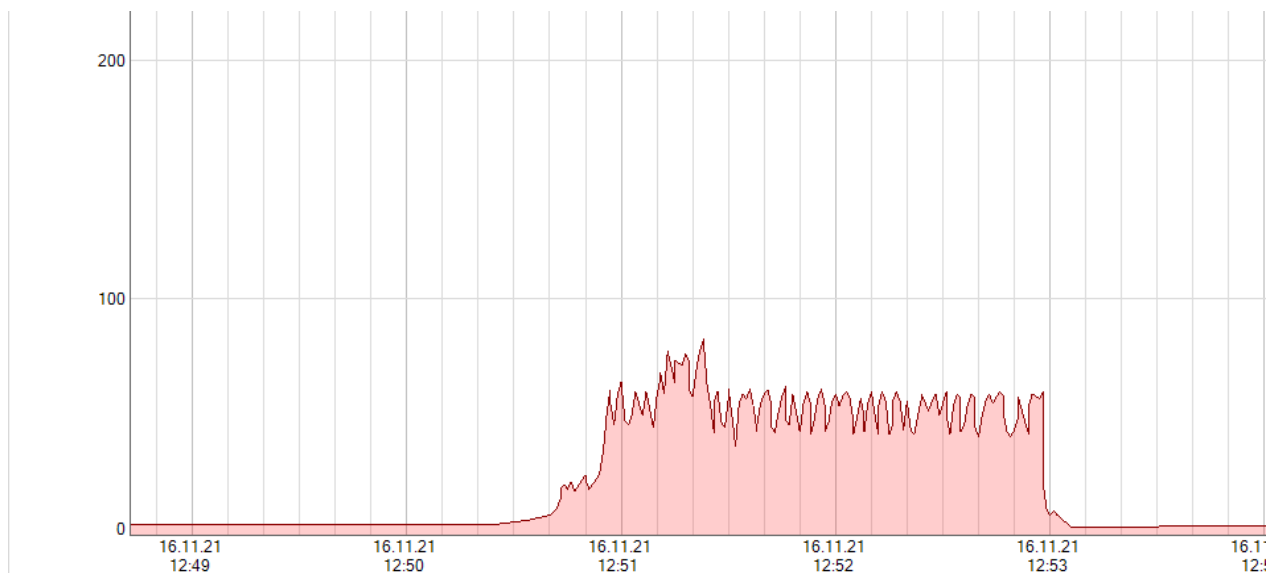


Рисунок 2.28 — График изменения давления на интервале № 1

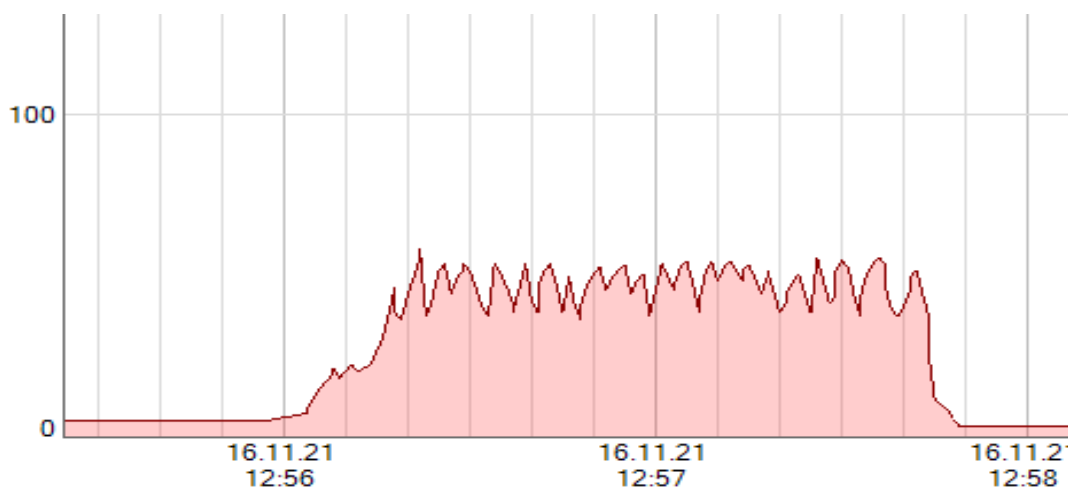


Рисунок 2.29 — График изменения давления на интервале № 2

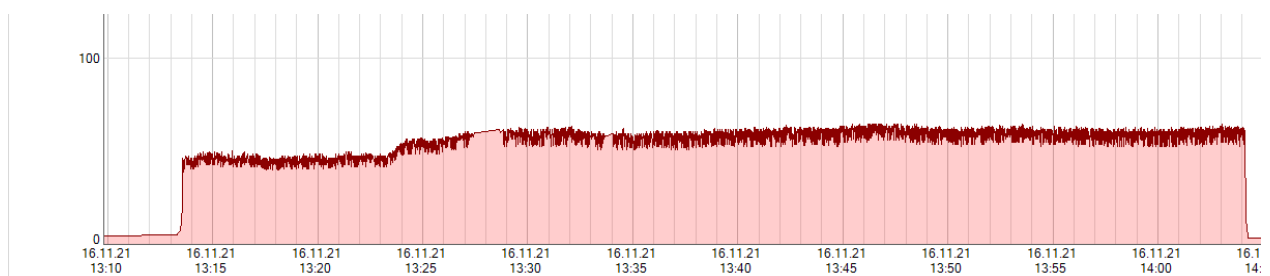


Рисунок 2.30 — График изменения давления при площадном нагнетании

Результаты прогноза выбросоопасности пласта представлены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 — Результаты прогноза выбросоопасности пласта 23 при проведении путевого уклона № 1

Параметр	Дата				
	17 ноября	18 ноября	19 ноября	20 ноября	21 ноября
Проведение за сутки, п. м	4	4	4	4	—
Проведение за месяц, п. м	4	8	12	16	—
Текущий прогноз	—	—	—	—	—
Опасно/не опасно	Не опасно	Не опасно	Не опасно	Не опасно	Опасно
Значение	2,2/3,8	3,6/1,8	2,0/2,4	2,9/3,6	2,8/8,1
Барьерная скважина правая самоист.	—	4,78	41,2	—	—
Барьерная скважина левая самоист.	—	78,3	49,1	—	—
Барьерная скважина левая (под разряжением)	—	2,78	4,7	—	—
Барьерная скважина правая (под разряжением)	—	44,7	27,8	—	—
Разряжение левой барьерной скважины (мм рт. ст.)	—	6,9	6,75	—	—
Разряжение правой барьерной скважины (мм рт. ст.)	—	6,9	10,95	—	—

Фактическая схема бурения скважин для поинтервального гидровоздействия и барьерной дегазации пласта в наклонном вентиляционном стволе № 2 (вариант 1) изображена на рисунке 2.31.

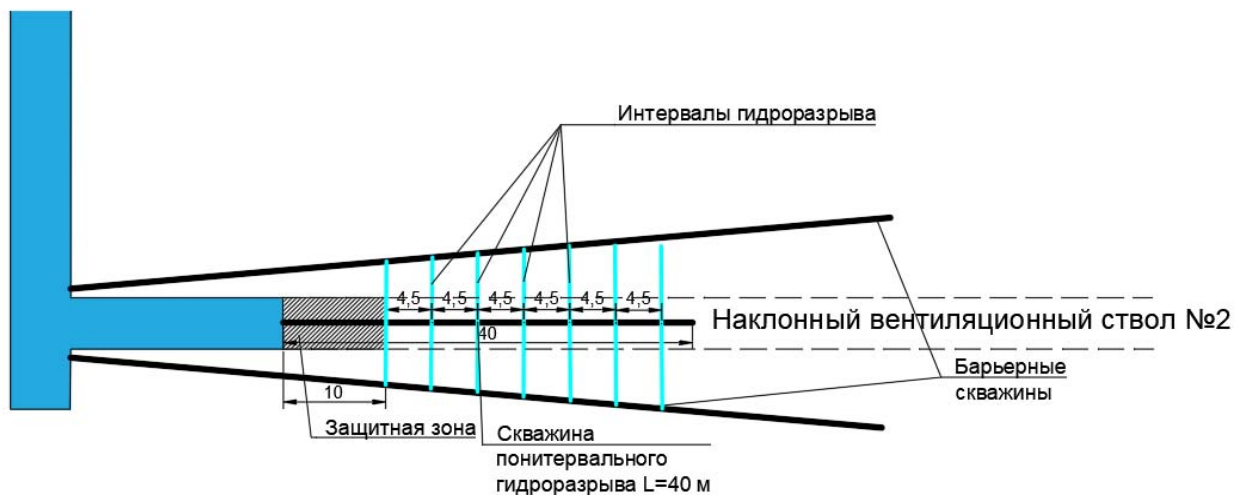


Рисунок 2.31 — Схема бурения скважины для поинтервального гидроразрыва в подготовительном забое наклонного вентиляционного ствола № 2

Длина передовой скважины поинтервального гидровоздействия составила 40 м, диаметр скважины 93 мм.

Передовая скважина поинтервального гидровоздействия была отбурена по оси выработки в центр угольного пласта по мощности.

Поинтервальное гидровоздействие производилось обратным ходом, от забоя скважины к устью. Участок скважины на глубину 10 м от устья не обрабатывался, т. к. является защитной зоной.

Перед началом процесса нагнетания жидкости выполнен замер концентрации метана  $\text{CH}_4$  на устье скважины поинтервального гидровоздействия и на двух ближайших к забою скважинах барьерной дегазации.

Концентрация  $\text{CH}_4$  до гидровоздействия:

- барьерная скв. № 1 (левая)  $\text{CH}_4$  — 5,1 %;
- барьерная скв. № 2 (правая)  $\text{CH}_4$  — 23,8 %.

Параметры выполнения поинтервального гидровоздействия при нагнетании жидкости в угольный пласт отражены в таблице 2.14.

Таблица 2.14 — Параметры поинтервального гидровоздействия при нагнетании жидкости в НВС № 2

Расстояние от устья скв., м	Время закачки, т, мин.	Объем закачки, V, л	Давление, P, атм.	Примечание
40,0	5	200	200	Истечение воды из скважины
37,5	10	450	200	—
33,0	10	450	200	—
28,5	15	550	200	—
24	15	550	250	—
19,5	10	400	240	—
15	10	600	180	—
10	10	600	180	—

После завершения процесса нагнетания жидкости выполнены замеры концентрации метана  $\text{CH}_4$  под вакуумом в барьерных скважинах и на устье скважины поинтервального гидровоздействия.

Сравнительная таблица замеров концентрации метана  $\text{CH}_4$  в скважинах представлена в таблице 2.15.

Таблица 2.15 — Сравнительная таблица замеров концентрации метана  $\text{CH}_4$  в скважинах путевого уклона № 1

Наименование скважины	До ПГВ 16.11.2021	После ПГВ 16.11.2021
Концентрация $\text{CH}_4$ . Барьерная скв. № 1 (левая)	5,1	6,3
Барьерная скв. № 2 (правая)	23,8	25,0

В процессе проведения поинтервального гидровоздействия датчиком ДДР производилась запись изменения давления. Графики давления представлены на рисунках 2.32–2.39.

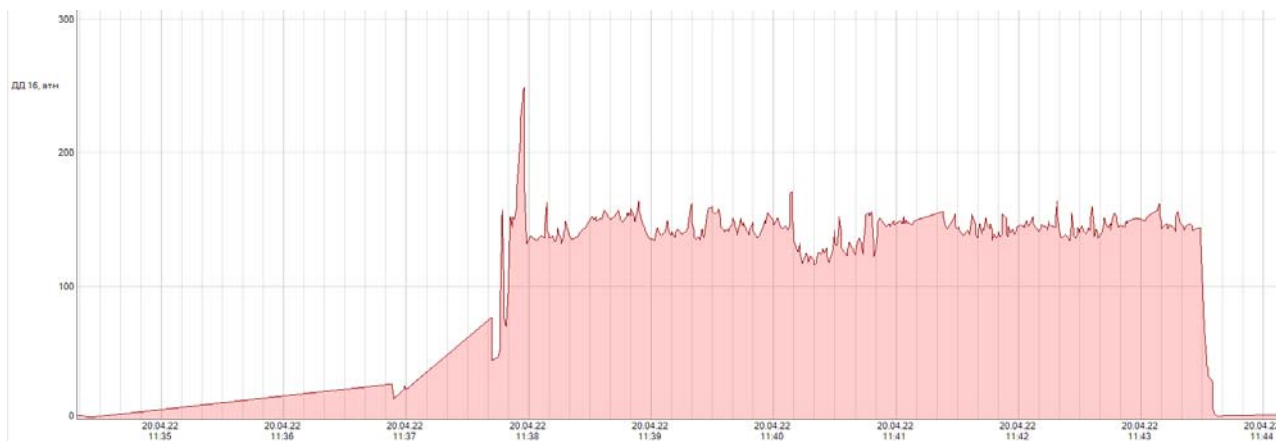


Рисунок 2.32 — График изменения давления на интервале № 1

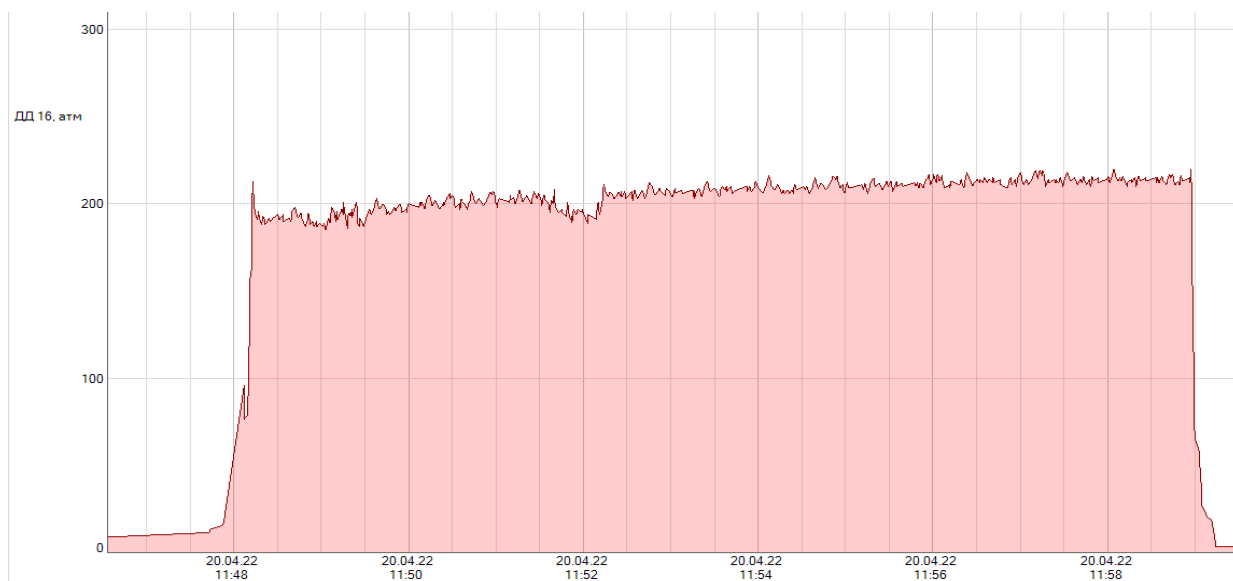


Рисунок 2.33 — График изменения давления на интервале № 2

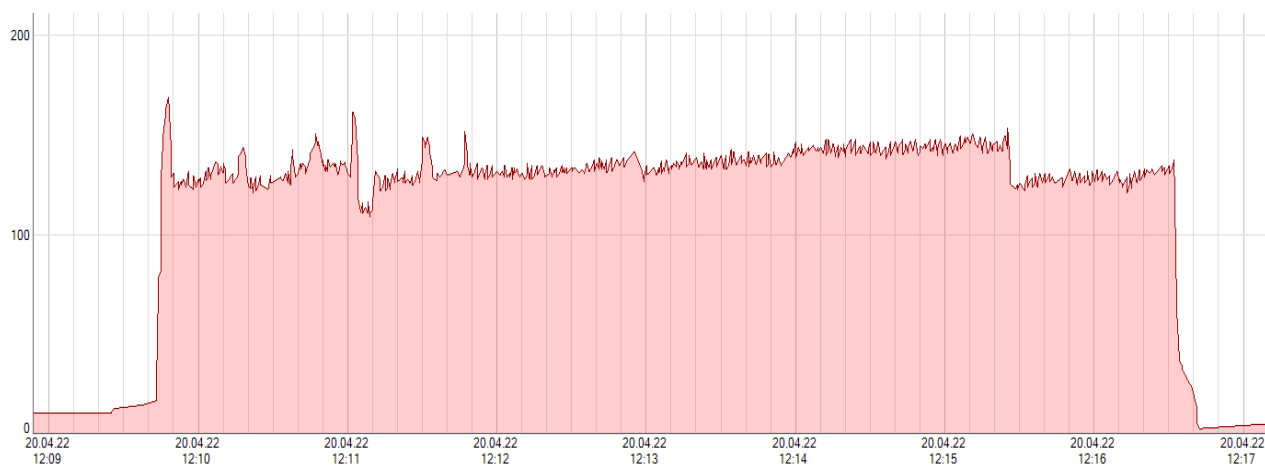


Рисунок 2.34 — График изменения давления на интервале № 3

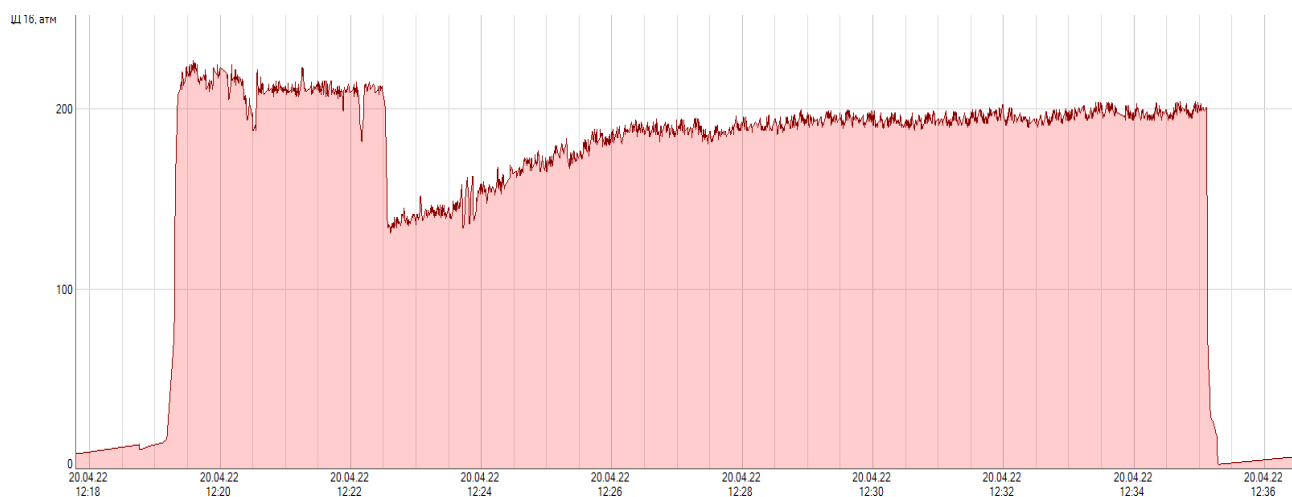


Рисунок 2.35 — График изменения давления на интервале № 4

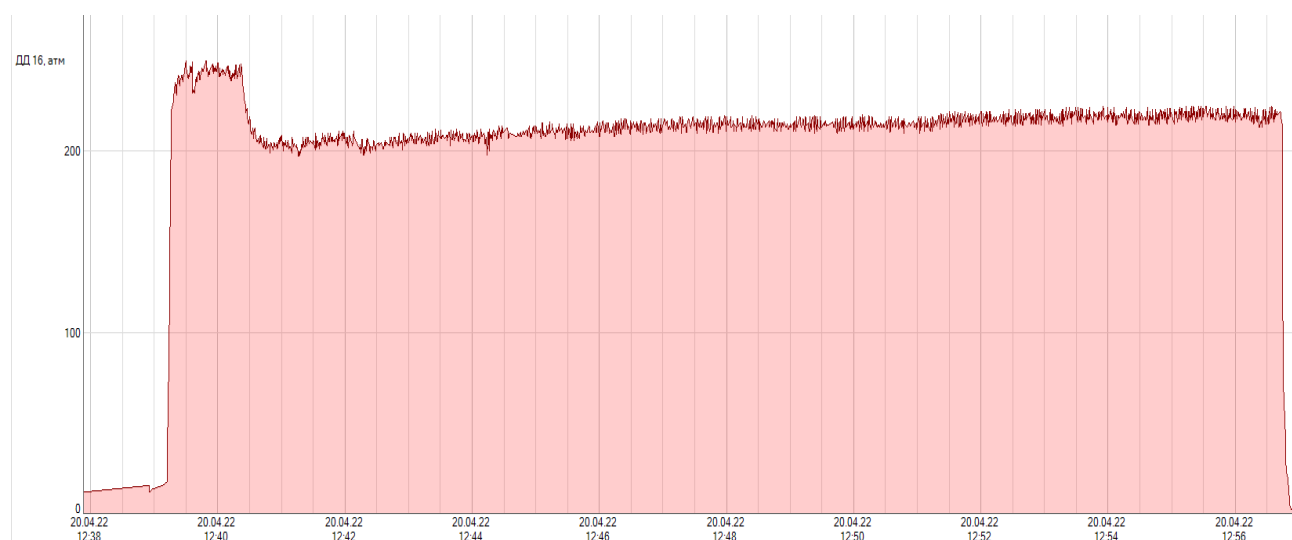


Рисунок 2.36 — График изменения давления на интервале № 5

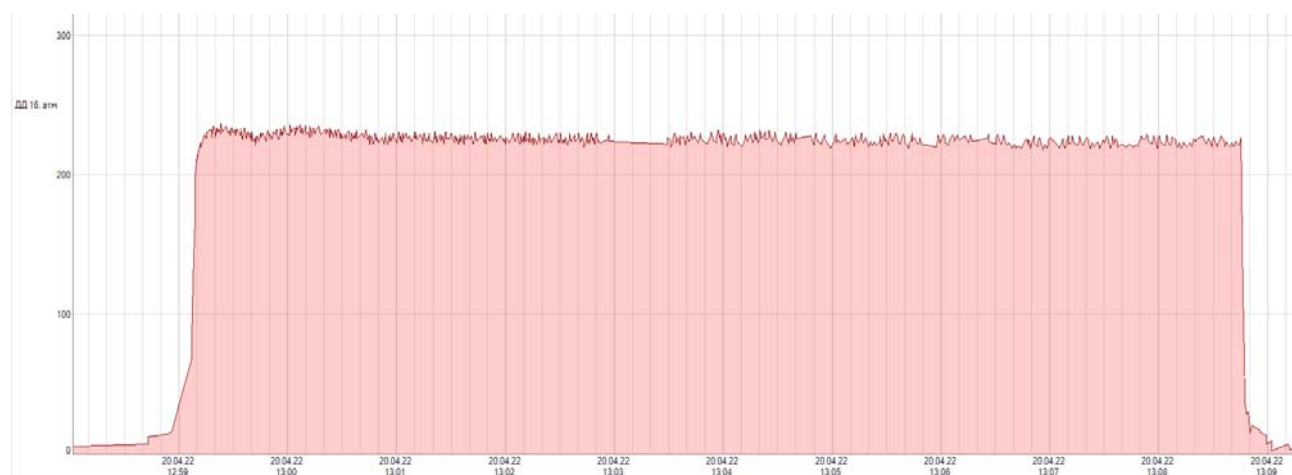


Рисунок 2.37 — График изменения давления на интервале № 6





Рисунок 2.38 — График изменения давления на интервале № 7

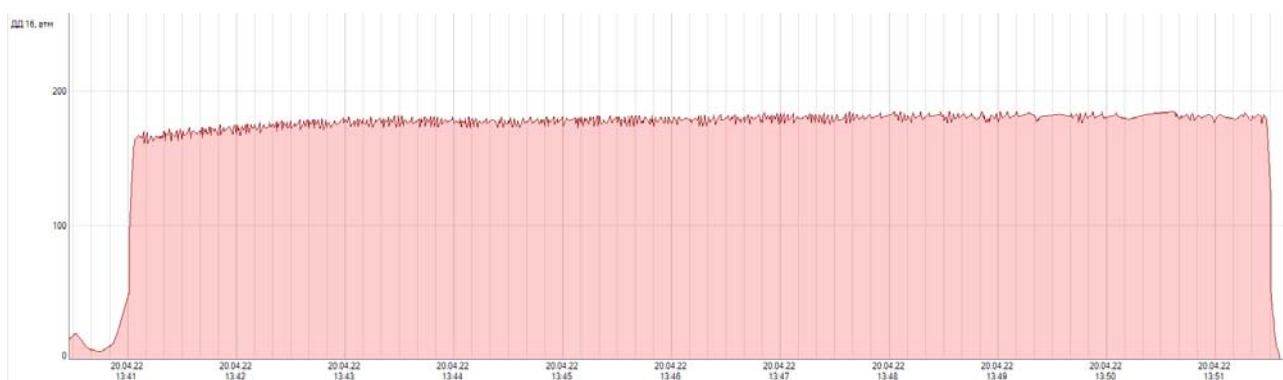


Рисунок 2.39 — График изменения давления на интервале № 8

В таблице 2.16 представлены результаты мониторинга проведения прогноза выбросоопасности и противовыбросных мероприятий в наклонном вентиляционном стволе № 2.

Фактическая схема бурения скважин для поинтервального гидровоздействия и барьерной дегазации пласта в подготовительном забое наклонного вентиляционного ствола № 2 (вариант 2) представлена на рисунке 2.40.

Длина передовой скважины поинтервального гидровоздействия составила 40 м, диаметр скважины 93 мм.

Передовая скважина поинтервального гидровоздействия была отбурена по оси выработки в центр угольного пласта по мощности под углом минус 1 градус.

Таблица 2.16 — Результаты мониторинга параметров дегазации и прогноза выбросоопасности и противовыбросных мероприятий на НВС № 2 (на участке поинтервального гидроразрыва)

	20 апр.	21 апр.	22 апр.	23 апр.	24 апр.	25 апр.	26 апр.	27 апр.	28 апр.	29 апр.	30 апр.	01 мая	02 мая	03 мая	04 мая	05 мая	06 мая	07 мая	08 мая	09 мая	10 мая	11 мая	12 мая
Проведение за суток, п. м	4	5	4	0	7	3	6	2	5	1	4	0	0	3	2	3	0	0	2	0	3	3	0
Проведение за месяц, п. м	4	9	13	13	20	23	29	31	36	37	41	41	41	44	46	49	49	49	51	51	54	57	57
Текущий прогноз	1 см.	1 см.	2 см.	—	1 см.	3 см.	3 см.	3 см.	3 см.	—	1 см.				1 см.	3 см.					2см.	1см.	1см.
опасно/не опасно	Не опасно	Не опасно	Опасно	Опасно	Не опасно	Не опасно	Не опасно	Не опасно	Не опасно	Не опасно	Опасно	Опасно			Не опасно	Не опасно					Не опасно	Не опасно	Не опасно
Значение (г/мин)		3,9/3,9	14,8/7,5		2,5/1,3	0,9/0,0	2,6/1,6	1,9/3,0	2,0/1,0		4,7/6,9				0,7/1,0	1,5/1,6					0,9/1,4		1,6/3,3
Текущий прогноз		3 см.	Не опасно		3 см.																		
опасно/не опасно		Не опасно	Не опасно		Не опасно																		
Значение (г/мин)		2,2/2,7			2,6/3,8																		
Бар. левая сторона		8,3	8,26	78,3	9	81	86	61,7	92,6	3,5	3,46	5,2	79,4	26	6,9	8,4	2,1	1,7	0,15	0,33	0,25	0,38	6,86
Бар. правая сторона		5,6	4,7	44,2	5,6	50,3	63,4	48,3	0,3	3,3	3,62	3,3	1,51	0,93	2,8	5,9	1,3	2	0,29	0,28	2,87	2,59	7,31
Бар. левая под разряжением		3,5	3,8	17,8	3,61	19,5	19	14,2	3,79	3,6	3,4	5,4	3,02	2,51	1,63	1,88	1,06	2,1	1,3	1,42	1,68	1,35	3,26
Бар. правая под разряжением		2,7	2,6	7,62	1,83	8,26	9,52	7,61	3,75	3,2	3,3	4,1	0,73	0,52	0,92	1,27	0,45	2,1	0,72	0,86	2,57	2,1	4,2
Разряжение левой стороны (мм рт. ст.)		11,5	11	17	17	17	16,9	15,8	14,7	15	15	17,5	14,77	16,7	15,9	16,3	15,7	15	14,02	14,3	14,7	14,2	14,8
Разряжение правой стороны (мм рт. ст.)		10,6	10,2	15,8	15,3	16,1	15,7	14,5	14,8	15	15	17,5	15,82	16,9	16,2	16,7	16	15	15,22	15	15,3	15	15,9
Контроль эффективности	1 см. Не опасно			2 см. Не опасно		2 см. Не опасно		1 см. Не опасно		2 см. Не опасно			1 см. Опасно	1 см. Не опасно					1 см. Не опасно				2 см.
опасно/не опасно				Не опасно		Не опасно		Не опасно		Не опасно			Опасно	Не опасно					Не опасно				Опасно
Значение (г/мин)	1,2/2,1			1,3/1,4		1,2/1,4		0,9/0,8		01.04.2002			5,1/7,1	0,7/1,0					1,2/1,1				2,7/4,2
Расход газа, Q <sub>газ</sub> , м³/мин		0,479	0,479	0,583	0,48	0,388	0,599	0,552	0,614	0,474	0,474	0,475	0,585	0,5	0,477	0,479	0,472	0,472	0,47	0,47	0,47	0,47	0,477
Добит СН4, м³/мин		0,0398	0,0396	0,4565	0,0432	0,4763	0,5151	0,3406	0,586	0,0166	0,0164	0,0247	0,4645	0,13	0,0329	0,0402	0,0099	0,008	0,0007	0,0016	0,0012	0,0018	0,0327



Рисунок 2.40 — Схема бурения скважины для поинтервального гидроразрыва в подготовительном забое вентиляционного ствола № 2

Оборудование было дослано на глубину 24 м. Поинтервальное гидровоздействие производилось обратным ходом, от забоя скважины к устью. Первый интервал был произведен на глубине 24 метра. Участок скважины на глубину 10 м от устья не обрабатывался, т. к. является защитной зоной.

Перед началом процесса нагнетания жидкости выполнен замер концентрации метана  $\text{CH}_4$  на устье скважины поинтервального гидровоздействия и на двух ближайших к забою скважинах барьерной дегазации.

Концентрация  $\text{CH}_4$  до гидровоздействия:

- барьерная скв. № 1 (левая)  $\text{CH}_4$  – 3,3 %;
- барьерная скв. № 2 (правая)  $\text{CH}_4$  – 13,2 %.

Параметры выполнения поинтервального гидровоздействия при нагнетании жидкости в угольный пласт отражены в таблице 2.17.

Таблица 2.17 — Параметры поинтервального гидровоздействия при нагнетании жидкости в НВС № 2

Расстояние от устья скв., м	Время зак., t, мин.	Объем зак., V, л	Давление, P, атм.	Примечание
24,0	10	200	105	
21	10	200	110	
18	10	200	100	

15	15	350	120	
12	15	350	100	
10	10	220	80	

После завершения процесса нагнетания жидкости выполнены замеры концентрации метана  $\text{CH}_4$  под вакуумом в барьерных скважинах и на устье скважины поинтервального гидровоздействия.

Сравнительная таблица замеров концентрации метана  $\text{CH}_4$  в скважинах представлена в таблице 2.18.

Таблица 2.18 — Сравнительная таблица замеров концентрации метана  $\text{CH}_4$  в скважинах барьерной дегазации наклонного вентиляционного ствола № 2

Наименование скважины	До ПГВ 12.05.2022	После ПГВ 12.05.2022
Барьерная скв. № 1(левая)	3,3	3,5
Барьерная скв. № 2 (правая)	13,2	14,0

В процессе проведения поинтервального гидровоздействия датчиком ДДР производилась запись изменения давления. Графики давления представлены на рисунках 2.41–2.46.

По результатам мониторинга параметров дегазации и прогноза выбороопасности установлено, что категория ОПАСНО, как правило, выявляется до входа забоя в зону гидрообработки либо после выхода из зоны. В связи с этим для обеспечения стабильной и безопасной работы забоев следует выполнять гидрообработку пласта таким образом, чтобы по трассе проведения выработки обеспечивалось наложение зон гидрообработки без оставления целиков при условии наличия и эффективной работы барьерной дегазации.

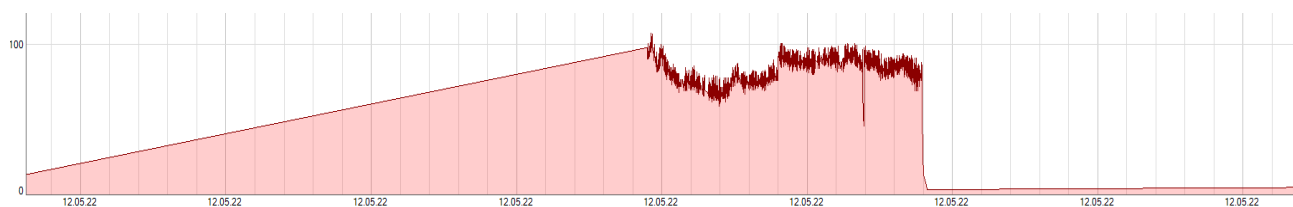


Рисунок 2.41 — График изменения давления на интервале № 1

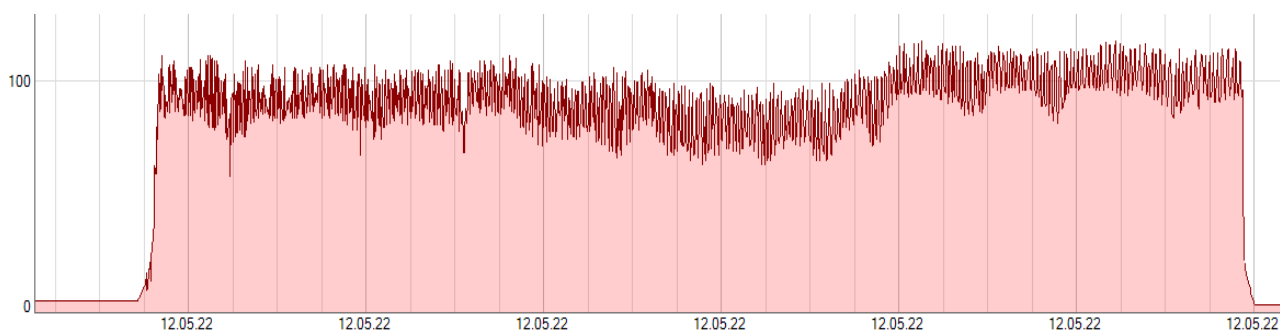


Рисунок 2.42 — График изменения давления на интервале № 2

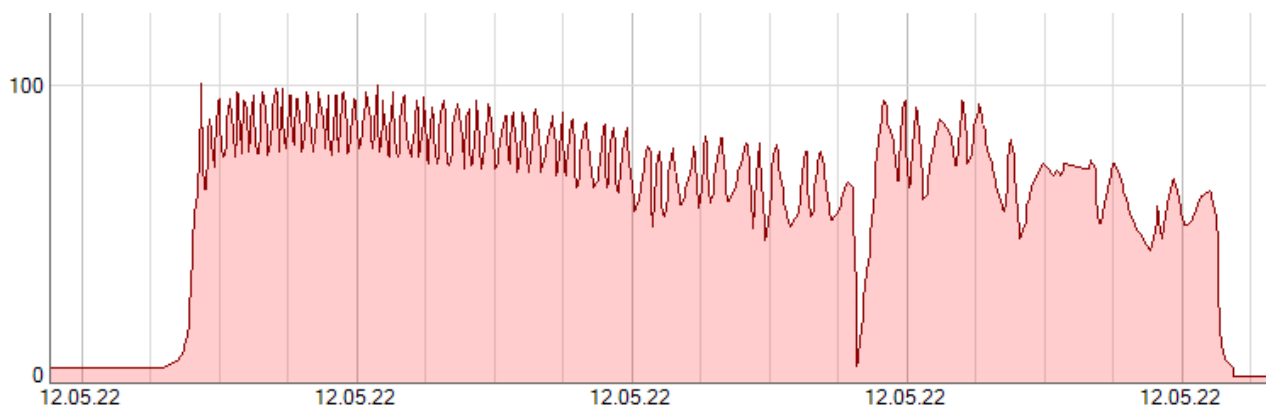


Рисунок 2.43 — График изменения давления на интервале № 3

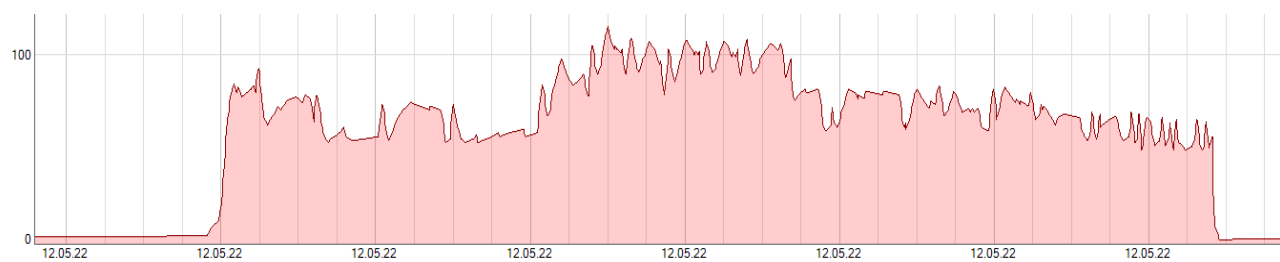


Рисунок 2.44 — График изменения давления на интервале № 4

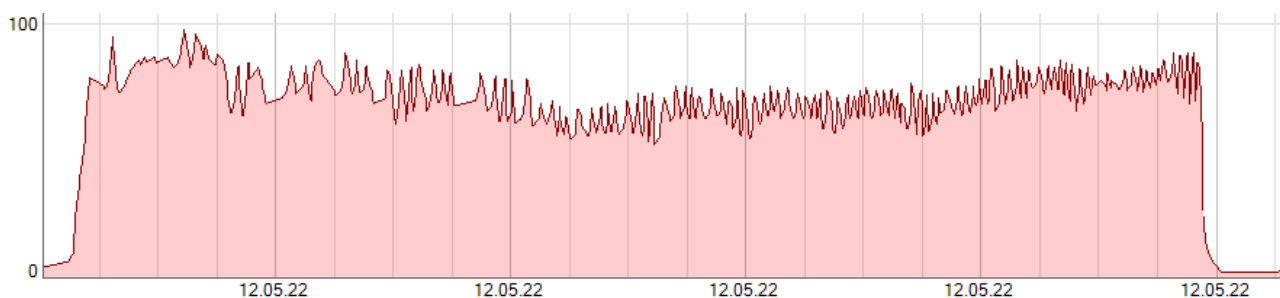


Рисунок 2.45 — График изменения давления на интервале № 5

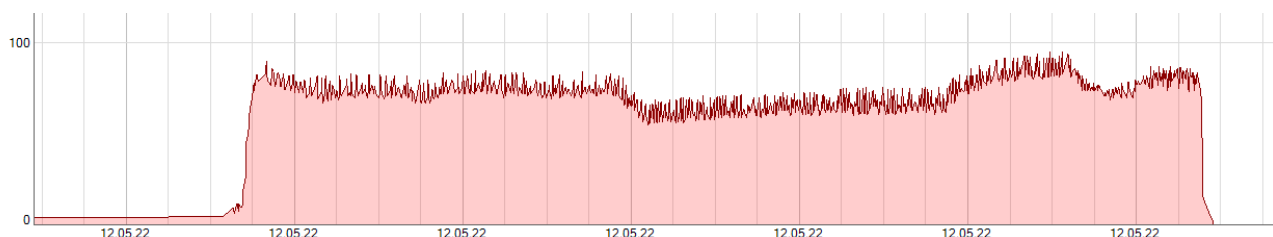


Рисунок 2.46 — График изменения давления на интервале № 6

Разработанный способ поинтервального гидровоздействия на выбросоопасный угольный пласт обеспечивает повышение эффективности барьерной дегазации за счет создания зон трещиноватости по трассе проведения горных выработок, соединенных с дегазационными скважинами, и при воздействии опорного давления от забоя в образующихся трещинах не создается опасного избыточного давления газа, т. к. он по сформированным каналам удаляется в дегазационные скважины, что обеспечивает предотвращение выбросов угля и газа.

С применением данной технологии выработки проводились по пяти шахтопластам: пл. 4 и 5 на ш. «Чертинская-Коксовая», пл. 23 ш. им. С. Д. Тихова, пл. 19 ш. «Костромовская», пл. Рывинный ш. «Спиридоновская». Общий объем проведения выработок – более 7 000 м. При этом достигнуто существенное снижение выбросоопасности, а также повышение темпов и безопасности ведения горных работ.

## 2.7 Оценка экономической эффективности разработанного способа повышения эффективности барьерной дегазации и предотвращения внезапных выбросов угля и газа

Известно, что при использовании бурения опережающих скважин для предотвращения внезапных выбросов угля и газа месячные темпы продвижения забоев по выбросоопасным пластам составляют не более 60–80 м/мес. Оценка экономической эффективности технологии с поинтервальным гидроразрывом пласта должна производиться на основании сравнения:

- с затратами на бурение опережающих скважин по традиционной технологии профилактики ГДЯ на угольных шахтах;
- стоимости простоя по добыче угля из очистного забоя в случае разрыва очистного фронта по причине его несвоевременного воспроизводства;
- затрат на ликвидацию последствий внезапных выбросов угля и газа.

Для предотвращения ГДЯ объем бурения опережающих и разведочных скважин в зависимости от условий может составлять от 15 до 50 и более метров на 1 п. м. выработки. Примем для расчета 15 м скважин на 1 п. м. выработки. В среднем категория ОПАСНО фиксируется в каждом забое по выбросоопасному пласту от 8 до 20 раз в мес. Тогда размер затрат на бурение опережающих скважин представлен в таблице 2.19.

Таблица 2.19 — Удельный размер затрат на бурение опережающих скважин при проведении 1 п. м выработки по выбросоопасному пласту

Наименования технико-экономических показателей	Значения		
Количество прогнозов ОПАСНО в мес., ед.	20	16	8
Темп продвижения, м/мес	70	80	100
Количество опережающих скважин, ед.	10	10	10
Средняя длина скважин, м	12	12	12
Удельная протяженность опережающих скважин на 1 п. м выработки	15	15	15

Стоимость бурения скважины, руб/м	1300	1300	1300
Стоимость затрат на бурение скважин, тыс. руб/мес	3120	2496	1248
Удельная стоимость бурения на 1 п. м выработки, тыс. руб.	44,57	31,20	12,48

Из опыта проведения выработок по пласту 5 в условиях ш. «Чертинская-Коксовая» следует, что с применением предложенного способа профилактики ГДЯ темпы подвигания подготовительных забоев составили 110–140 м/мес даже при работе в синклинальных складках и в зонах влияния геологических нарушений. В отдельные месяцы удавалось достичь темпов 160 м/мес. Рассмотрим на примере подготовки выемочного столба с общей протяженностью подготовительных и прочих пластовых выработок 5800 м. Примем средние темпы проведения выработок с предотвращением ГДЯ: бурением опережающих скважин — 80 м/мес; с применением ИГРП — 120 м/мес. Сравнение затрат на предотвращение ГДЯ различными способами приведено в таблице 2.20.

Таблица 2.20 — Затраты на предотвращение ГДЯ различными способами

Способы предотвращения ГДЯ	Затраты при проведении 5800 м выработок, тыс. руб.	Затраты шахты на мероприятия по предотвращению ГДЯ ежемесячно, тыс. руб.
Бурение опережающих скважин, тыс. руб.	36 192	2 496
Передовое гидровоздействие, тыс. руб.	18 023	1 858

Из таблиц 2.19 и 2.20 видно, что при оконтуривании выемочного столба с 5,8 км выработок затраты на бурение опережающих скважин составят более 36 млн руб., на гидровоздействие – 18 млн руб. Таким образом, разработанная технология позволяет существенно повысить темпы проведения выработок и снизить более чем в 2 раза затраты на реализацию мероприятий по предотвращению внезапных выбросов угля и газа.



Задействовав пять забоев для подготовки выемочного столба, можно определить расчетный срок его подготовки. Минимальные сроки представлены на рисунке 2.47.

При разрыве очистного фронта в 4,8 мес. затраты на поддержание жизнеспособности шахты составят почти 2,9 млрд руб., недополученная выручка — более 4 млрд руб. (рисунок 2.48). Крайний случай — это авария (внезапный выброс угля и газа). В среднем затраты, связанные с ликвидацией последствий, в т. ч. простои, ликвидация аварии, восстановление выработок, оборудования, выплаты семьям погибших, могут достигать 0,9–1,5 млрд руб.

Таким образом, максимальный экономический эффект от внедрения предложенной технологии гидровоздействия при подготовке выемочного столба с протяженностью выработок 5800 м может превысить 7 млрд руб. в случае сокращения разрыва очистного фронта на 4,8 мес.



Рисунок 2.47 — Сравнение сроков подготовки выемочного участка с использованием разных способов предотвращения ГДЯ

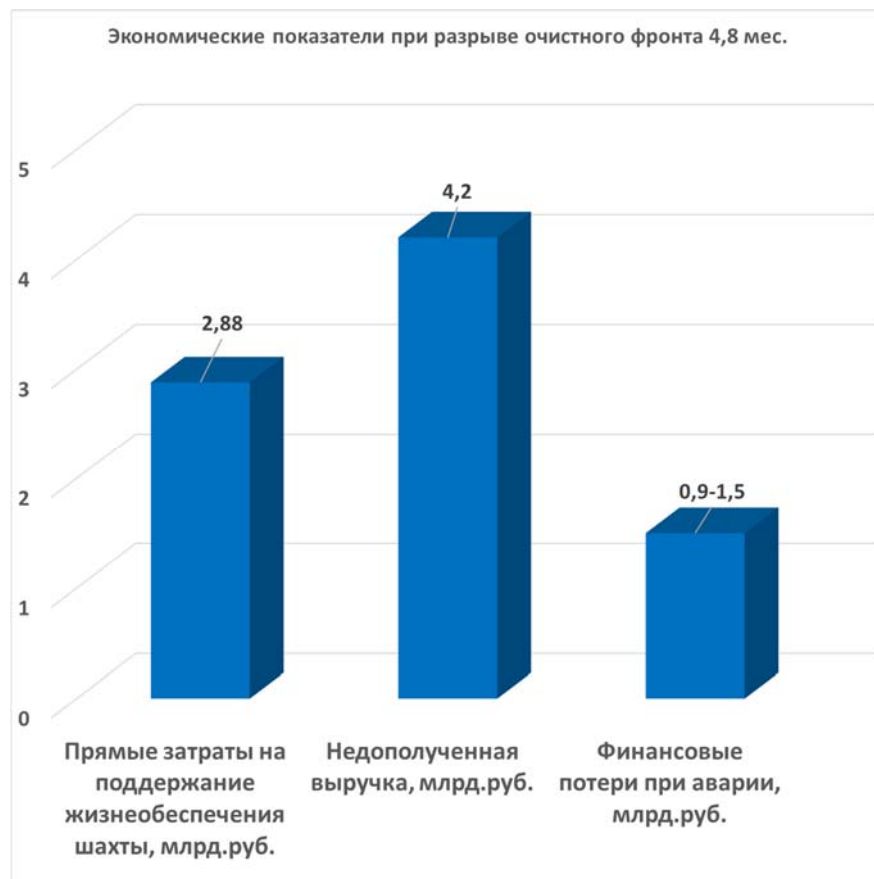


Рисунок 2.48 — Экономические показатели при разрыве очистного фронта в 4,8 мес.

## 2.8 Выводы по главе 2

1. По результатам моделирования методом PKN получены параметры проведения гидроразрыва и развития трещин на пластах малой и средней мощности. Натурные исследования в пластовых горных выработках и подготовительных забоях подтвердили расчетные параметры. На пластах малой и средней мощности при существующей технике и технологии рекомендованы следующие параметры поинтервального гидроразрыва в подготовительных забоях для повышения эффективности барьерной дегазации и предотвращения ГДЯ: длина скважин для поинтервального гидроразрыва 30–60 м; межпакерный интервал до 0,2 м; эффективное расстояние между интервалами 3–4,5 м; темп закачки жидкости 18–66 л/мин; объем закачки 150–350 л на один интервал; длина барьерных скважин 60–80 м.

2. Опробованная технология по активной длине скважины соответствует гидроотжиму; по величине отношения давления нагнетания жидкости к гидростатическому ( $P_{\text{зак}}/\gamma H = 1 - 2.9$ ) процесс сопоставим с режимами гидрорыхления, гидроотжима и гидроразрыва; по таким критериям, как глубина герметизации скважин и радиус эффективного влияния, данная технология не соответствует параметрам ни одного из регламентированных способов предотвращения ГДЯ гидрообработкой. Связи с этим данный способ следует называть поинтервальным гидроразрывом угольного пласта для повышения эффективности барьерной дегазации и предотвращения газодинамических явлений.

3. По результатам натурных исследований установлено, что давление нагнетания жидкости практически не зависит от глубины ведения горных работ, а определяющим фактором являются параметры природной трещиноватости и ориентировка основных систем природных трещин относительно оси скважины поинтервального гидроразрыва.

4. На основании выполненных с 2019 г. исследований при проведении более 7000 м выработок по выбросоопасным пластам установлено, что применение поинтервального гидроразрыва позволяет на порядок снизить частоту получения прогноза категории ОПАСНО и за счет снижения трудоемкости противовыбросных мероприятий увеличить темпы проведения выработок с 60–80 м/мес до 100–160 м/мес.

5. В сравнении с бурением опережающих скважин внедрение технологии поинтервального гидроразрыва пласта из подготовительного забоя позволяет более чем в 2 раза снизить затраты на претовращение внезапных выбросов угля и газа.

### **Глава 3. ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ НА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ: ФАКТОРЫ ПРОЯВЛЕНИЯ, АНАЛИЗ СВОЙСТВ ПОРОД ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ГОРНЫХ МАССИВОВ**

#### **3.1 Оценка горно-геологических условий возникновения газодинамических явлений в выработках рудника «Интернациональный» (ПАО «АЛРОСА»)**

На текущем этапе разработки месторождения алмазов рудником «Интернациональный» (ПАО АЛРОСА) предусматривается вскрытие и подготовка горизонтов на глубине до 1200 м. На таких значительных глубинах вмещающие породы подвержены действию высокого горного давления и газонасыщены. Технология проведения подготовительных выработок должна учитывать склонность этих пород к газодинамическим явлениям (ГДЯ) в виде внезапных выбросов породы и газа.

В рамках данной работы выполнен обзор опубликованных и фондовых источников, касающихся трубки Удачная, как наиболее изученной и сложной, а также других трубок Мирнинского района. Для выявления структурного и литологического контроля проявления выбросов породы и газа на руднике «Интернациональный» проанализированы геологические условия как во вмещающих породах, так и на контакте с кимберлитовым телом. Для исследования петрографии пород, выявления эпигенетических процессов и закономерностей распределения газовой фазы в объеме породы проведено изучение образцов пород.

Выполнена генетическая интерпретация результатов литолого-минералогических и электронно-микроскопических исследований кернового материала, проведена реконструкция механизмов образования очагов ГДЯ.

Обзор современных публикаций показывает, что разработка алмазных месторождений осложняется целым рядом региональных геологических особенностей [34, 63, 90, 125, 188].

Все месторождения Якутии характеризуются региональной нефтегазоносностью вмещающих отложений, что проявлено в неравномерном распределении газов, битумов и нефти, обусловленном различными коллекторскими свойствами пород, чаще всего карбонатных. Трубка Удачная из месторождения Мирнинской группы является наиболее изученной в отношении газоносности.

Анализ литературных данных по трубке Удачная [39, 63, 103, 171] позволяет показать, что наиболее важными факторами, определяющими газоносность месторождения, являются формы нахождения газов. К основным типам газового состояния трубки Удачная относятся три их разновидности: свободная, сорбированная и водорастворенная. Гидратная форма может сохраняться некоторое время в виде реликтовой и за пределами зон пониженных температур, но ее состав и вклад в газоносность рудников в настоящее время не исследованы.

*Водорастворенная форма* характерна для подмерзлотных вод. Первоначальный дебит газов был порядка 42 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Подмерзлотные рассолы месторождения и региона характеризуются высоким содержанием углеводородных газов. Доля метана в смеси достигает до 85 %, а тяжелых углеводородов до 10 %. Высокие концентрации гомологов метана связываются с нефте- и битумопроявлениями в горных породах.

*Сорбированные газы* содержатся в порах и переходят в свободное состояние при их разрушении. Среднее содержание сорбированных газов выше, чем свободных. Поэтому после проведения взрывных работ высвобождается значительный объем метана, способного к повторному взрыву в выработке.

*Свободные газы* не связаны с породой массива и мигрируют в нем при изменении гидрогеологических условий. Их распределение в горном массиве носит чрезвычайно сложный характер. Свободные газы нефтебитумных и газовых проявлений имеют углеродно-азотный состав, но доминирующим компонентом углеводородных газов является метан (до 90 %). Азот составляет

7–60 %, водород до 1 %, CO<sub>2</sub> — до 3 %, гелия — до 0,06 %. Свободные газы считаются наиболее опасными. Они встречались и отмечаются при ведении взрывных работ в забоях в вертикальных стволах, наклонных съездах, квершлагах и других горных выработках.

Газо- и нефтеносность вмещающих пород и, в меньшей степени, кимберлитов обусловила отнесение подземного рудника к опасным по газонефтепроявлениям. Нефтегазопроявления приурочены к интервалам в карбонатных пластах, породы которых обладают повышенной пористостью. Интервалы с пористостью, превышающей фоновую, относятся к потенциальным коллекторам нефти и газа. Такие пласты-коллекторы на рассматриваемом месторождении выделены по результатам геофизических исследований в большинстве скважин. Коллекторы подразделяются на нефтегазонасыщенные и водонасыщенные.

В 2000 году в лаборатории геохимии каустобиолитов Института проблем нефти и газа (г. Якутск) проанализированы нефть и водонефтяная эмульсия, отобранные из зумпфа на горизонте № 8 (-560 м) (отложения олекминской свиты). Исследование показало, что нефть малопарафинистая (0,56 %), среднесернистая (1,05 %), со средней плотностью (887,7 кг/м<sup>3</sup>) и вязкостью 146,76 мм<sup>2</sup>/с. Содержание механических примесей 0,18 %, вода практически отсутствует. В групповом составе нефти 76 % приходится на долю углеводородов, среди которых метаново-нафтеновые структуры преобладают над нафтенно-ароматическими. Нефть – высокосмолистая (19,47 %). Асфальтовые компоненты составляют 4,53 %.

Водовмещающие породы — окремненные трещиноватые известняки и доломиты с линзами водоупорных гипс-ангидритов — представляют собой трещинно-порово-пластовый коллектор и характеризуются изменчивостью фильтрационных свойств. Рассолы месторождения характеризуются повсеместной газонасыщенностью и варьируются в пределах 0,008–1,0 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> и более [168].

Начиная с апреля 2013 г, зафиксировано свыше 45 газодинамических явлений в выработках рудника «Интернациональный», спровоцированных ведением буровзрывных работ, при которых выбросы горной массы и газа достигали значительных масштабов: пиковый объем выброшенной породы составил 800 м<sup>3</sup>, газа — 7433 м<sup>3</sup> [6]. Полости выбросов породы и газа имели полусферическую или полуэллиптическую форму, а примыкающие к ним породы характеризовались появлением тонкой плитчато-скорлуповатой отдельности, что свидетельствует о разрушении вмещающих пород по механизму послойного отрыва и высвобождении газовой фазы непосредственно из вмещающих пород. Проявление выбросов породы и газа и интенсивных газовыделений определяет необходимость перевода рабочих зон выработок рудника «Интернациональный», проходимых во вмещающих породах ниже отметки -790 м, в опасные по газу и ГДЯ.

На рисунке 3.1 и в Приложении 1 приведена хронология произошедших газодинамических явлений и газовыделений на руднике «Интернациональный», их пространственная привязка, а также показана их приуроченность к определенным литологическим разностям и тектоническим (складчатым и разрывным) нарушениям. Поскольку в подавляющем числе случаев газодинамические явления оказались приурочены к многочисленным доломитовым пластам, для них использована нумерация (от 1 до 5), по мере погружения вниз по разрезу от нижнего пласта каменной соли толбачанской свиты, использованная ранее С. Г. Ворожцовым [75].



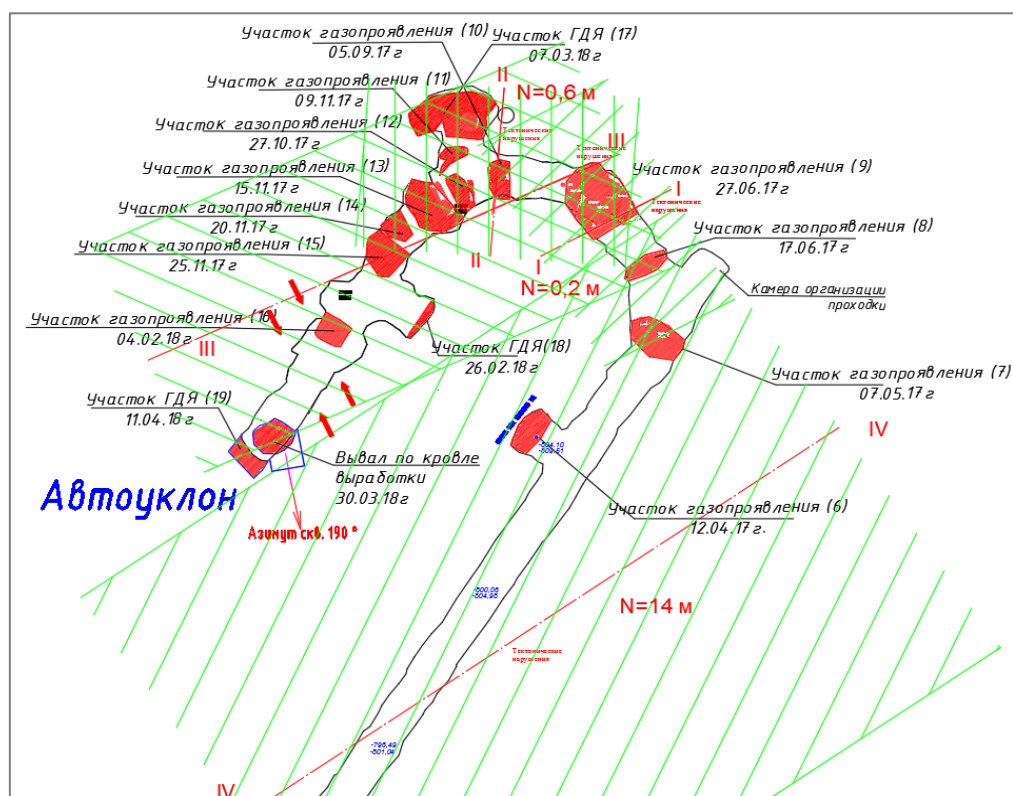


Рисунок 3.1 — План-схема и последовательность ГДЯ за 2017–2018 гг. в горных выработках рудника «Интернациональный». Штрих-пунктиром обозначены осевые линии нарушений, заштрихованные области — расчетные зоны влияния нарушений

Ниже приводятся результаты структурно-геологической интерпретации геологических материалов из актов расследования по газодинамическим явлениям, а также результаты авторского мониторинга состояния массива в подземных выработках объекта.

На основе геологической характеристики участка горных пород и материалов внутренних расследований ГДЯ установлено, что в интервале отметок -790...-920 м вскрыт газоносный карбонатный массив толбачанской свиты, который представлен чередованием пластов каменной соли (мощностью 2-15 м и соленасыщенностью 12-32 %) с прослоями доломитов и мергелей, подстилаемых битуминозными известняками и доломитами (таблицы 3.1–3.3) [50].

Также регулярно встречаются прослои мощностью 0,1-0,2 м окремненных строматолитовых доломитов волнистой текстуры, плотных, крепких и глинистых доломитов, которые вполне могут являться газоупорным

экраном для залегающих ниже доломитов онколитовой текстуры, характеризующихся концентрически-зональной слоистостью и интенсивной трещиноватостью [50, 129].

Таблица 3.1 — Основные физико-механические свойства пород отложений толбачанской свиты

Наименование	Предел прочности при одноосном сжатии, МПа $\sigma_{сж}$	Предел прочности при растяжении, МПа $\sigma_{раст}$	Предел прочности при срезе при угле 30°, МПа	Предел прочности при срезе, МПа		Скорость продольной волны, м/с	Угол внутреннего трения, град.	Условное сцепление, МПа
				Нормальное сжимающее напряжение при угле 45°	Нормальное сжимающее напряжение при угле 30°			
Доломит	<u>21,0–187,5</u> 68,9	<u>2,12–11,16</u> 5,83	<u>4,1–83,9</u> 20,77	<u>5,5–137,0</u> 44,0	<u>2,3–48,4</u> 12,0	<u>4545–9091</u> 6206	<u>14,0–42,1</u> 34,3	<u>4,1–33,5</u> 12,7
Доломит глинистый	<u>5,1–132,5</u> 58,7	<u>1,37–10,03</u> 5,67	<u>6,8–48,7</u> 18,5	<u>11,0–103,9</u> 33,8	<u>3,9–28,1</u> 10,7	<u>3125–8696</u> 5785	<u>13,5–38,8</u> 31,4	<u>4,9–25,6</u> 12,1
Доломит известковистый	<u>21,5–103,5</u> 59,5	<u>3,5–10,66</u> 5,57	<u>6,8–37,5</u> 16,7	<u>11,0–119,3</u> 46,3	<u>3,9–27,9</u> 9,6	<u>4545–9524</u> 6444	<u>28,9–41,2</u> 35,3	<u>8,5–12,1</u> 9,7
Доломит плотный	<u>6,5–165,0</u> 58,5	<u>0,94–10,97</u> 5,87	<u>5,4–48,7</u> 19,1	<u>8,8–172,4</u> 40,9	<u>3,1–28,1</u> 11,0	<u>3226–8000</u> 5800	<u>9,2–42,6</u> 33,4	<u>5,0–22,7</u> 11,8
Каменная соль (галит)	<u>4,4–18,5</u> 9,9	<u>0,65–1,13</u> 0,94	<u>1,7–3,7</u> 2,6	<u>2,2–4,4</u> 3,6	<u>1,0–2,1</u> 1,5	<u>3077–4651</u> 3980	24,8	1,9

Таблица 3.2 — Дополнительные физико-механические свойства пород толбачанской свиты

Наименование	Влажность, % $w$	Объемная масса, г/см <sup>3</sup> $\delta$	Удельная масса, г/см <sup>3</sup> $\gamma$	Общая пористость, % $n$
Доломит	<u>0,04–3,67</u> 1,13	<u>2,47–2,83</u> 2,62	<u>2,71–2,99</u> 2,81	<u>1,6–16,6</u> 8,0
Доломит глинистый	<u>0,12–2,44</u> 0,90	<u>2,5–2,82</u> 2,67	<u>2,72–2,99</u> 2,82	<u>0,9–13,6</u> 6,1
Доломит известковистый	<u>0,2–1,08</u> 0,64	<u>2,49–2,77</u> 2,68	<u>2,83–2,93</u> 2,85	<u>3,9–12,8</u> 6,7
Доломит плотный	<u>0,1–3,49</u> 1,14	<u>2,44–2,90</u> 2,63	<u>2,64–2,99</u> 2,84	<u>3,3–14,6</u> 8,3
Каменная соль (галит)	<u>0,05–0,07</u> 0,06	2,1		

Таблица 3.3 — Сводные данные по газоносности пород толбачанской свиты

Наименование	Газоносность $q$ , $\text{м}^3/\text{м}^3$	Начальное давление, МПа	Начальная скорость газовыделения, л/мин
Доломит	$\frac{0,05-2,30}{0,358}$	0,202	0,81
Доломит глинистый	$\frac{0,05-2,86}{0,433}$	0,204	1,55
Каменная соль (галит)	0,5	0,190	0,02

Онколитовые доломиты характеризуются высокой газонасыщенностью: содержащийся в трещиноватых зонах свободный и сорбированный газ высвобождается в ходе БВР одновременно с выбросом горной массы.

Мониторинг и прогнозирование ГДЯ на руднике указывают на опасный характер ведения работ на горизонтах ниже -790...-920 м, где фиксировались как спонтанные, так и инициированные взрывом выбросы [158]. Данные процессы отличались высокой интенсивностью газовыделения и отсутствием четко выраженных предвестников, что существенно осложняет обеспечение безопасности ведения добычных работ и стабильности работы рудника [57].

На основании данных по газообильности пород, концентрации газа, интенсивности газовыделений сделаны выводы о высокой вероятности газодинамических явлений [123]. На основе результатов геофизической съемки по акустической эмиссии в отношении галитосодержащих доломитов отмечена их слабая устойчивость и склонность к вывалам в кровле.

Натурными и лабораторными исследованиями определены газонасыщенность, газодинамические характеристики и физико-механические свойства вмещающих слоев горных пород, предопределяющие газодинамические явления [160].

Лабораторными и экспериментальными исследованиями выделены породы (доломиты), **появление которых в массиве является прогностическим признаком зон, опасных по выбросам** [167].

Изучены физические [206] и прочностные [118] свойства пород глубоких горизонтов трубки «Интернациональная». Для образцов пород по глубине определены влажность, плотность и объемный вес, общая пористость, пределы прочности на сжатие и растяжение.

В целом ранее проведенными исследованиями установлено, что предвестником выброса породы и газа в условиях рудника «Интернациональный» при проходке является резкое увеличение газовыделения в выработку из массива, шпуров и скважин.

Принимая во внимание рост горного давления на глубоких горизонтах, выдвигается гипотеза, что склонность массива к ГДЯ обусловлена сочетанием физико-механических характеристик карбонатов, их высокой трещиноватости и локальной газонасыщенности. Данные факторы выступают определяющими при проведении выработок, где **импульсы от БВР становятся триггером для реализации потенциала ГДЯ [129].**

Важным обстоятельством является то, что ранее, **на других рудниках при больших глубинах, проявление выбросов породы и газа, именно в доломитах, не отмечалось до 2009 г. и, как правило, при проходке отсутствовали выраженные предупредительные признаки подготовки выброса.** В 2017 г. опубликованы первые данные о проявлениях внезапных выбросов доломита и газа на рудниках по добыче медной руды Polkowice-Sieroszowice и Rudna на месторождении Legnica-Głogów в Польше [50, 216–217, 219]. Также наиболее близкие по характеристикам выбросы породы и газа наблюдались на шахтах Донецкого угольного бассейна [25, 37, 68], где прослой песчаника выступали коллекторами метана из угольных пластов. Здесь же слои и прослой доломитов различного метаморфизма изначально содержат метан и водород. Содержание метана в пробах газа достигает 84,5 %, водорода — 10,5 %. Максимальное значение газонасыщенности пластов выбросоопасных доломитов составляет  $2,3 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , а невыбросоопасных доломитов —  $2,86 \text{ м}^3/\text{м}^3$  [50].

Поэтому особое внимание необходимо уделять определению механизмов и локальных признаков формирования газодинамических явлений, чтобы минимизировать риски их проявления на стадии планировании и при проведении работ.

### **3.2 Топология и показатели внезапных выбросов**

За указанный период на руднике документально подтверждено 47 событий (таблица 3.4, рисунок 3.2), сопровождавшихся выбросами породы и газа. Отдельные случаи загазирования выработок без выброса породы, в том числе при бурении скважин, не рассматривались.

Из множества вмещающих пород, встречаемых на руднике, источником газа, в зависимости от участка, в **актах комиссий по расследованию газодинамических явлений** выявлены (рисунок 3.3) [50]:

1. Доломиты органогенные, бежевые, коричневато-серые, окремненные, волнисто-слоистые, **характеризуются интенсивной концентрически-зональной трещиноватостью**, битуминозные, нефтесодержащие, плотные, крепкие, отличаются повышенной газонасыщенностью.

2. Доломиты органогенные, песчанистые, бежевые, коричневато-серые, окремненные, волнисто-слоистые, **характеризуются интенсивной субвертикальной плитчатой трещиноватостью**, битуминозные, нефтесодержащие, плотные, крепкие, отличаются повышенной газонасыщенностью.

Оба варианта подробно описаны и фигурируют в отчетах за все время наблюдений. Начиная с 2020 года видимых изменений в свойствах газоносных слоев не отмечено, но в некоторых актах появляются доломиты той же структуры, но отмеченные как более темные, буро-коричневые. Мощность газоносных слоев варьируется от 0,5 до 4,7 м [50].

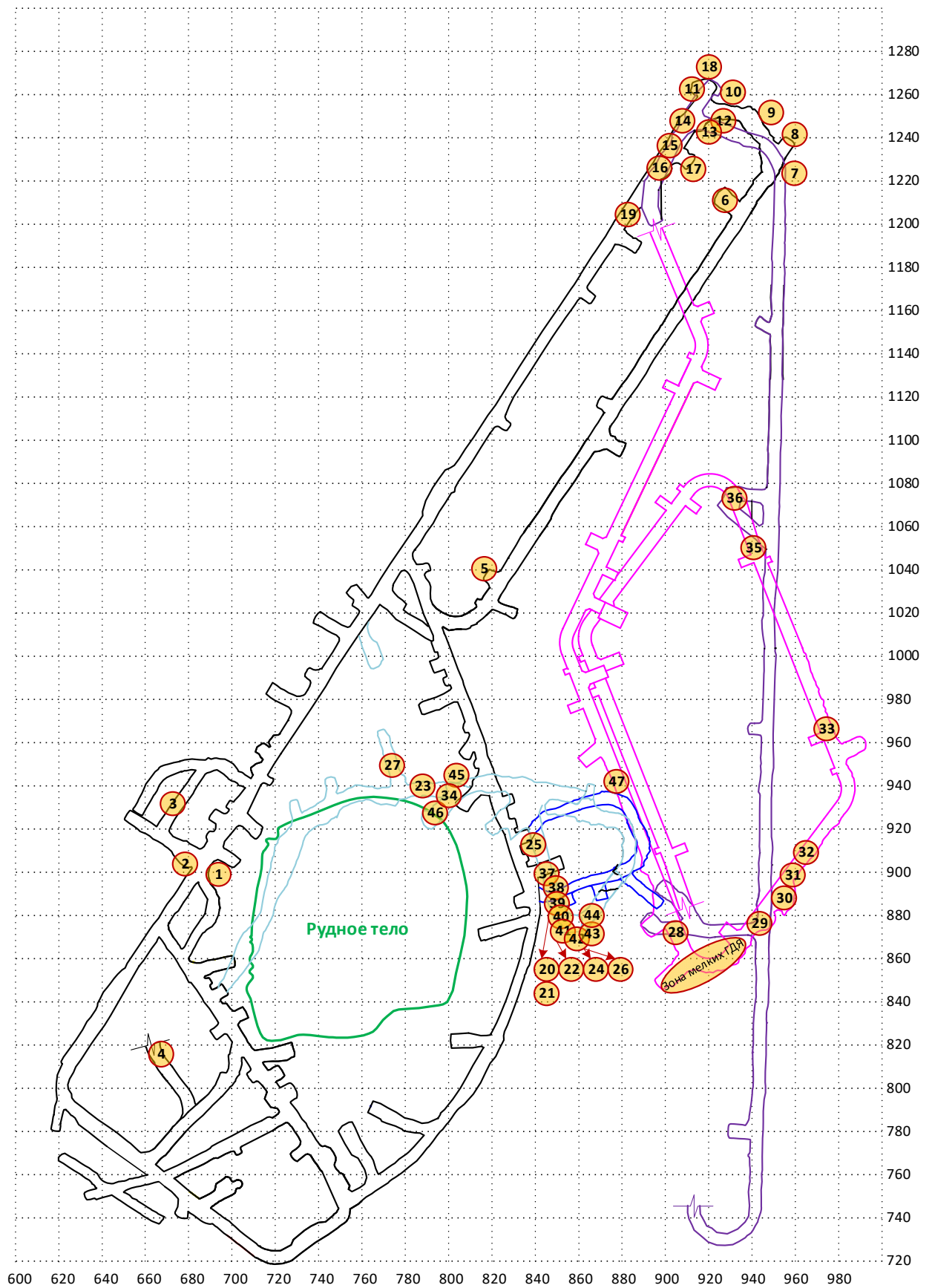


Рисунок 3.2 — План-схема горных выработок и внезапных выбросов на отметке  
-790 / -925 м (2013–2023 гг.)

Таблица 3.4 — Показатели и характеристики зарегистрированных внезапных выбросов за 2013–2023 гг.

№ п/п	Дата	Максимальная концентрация метана, %	Время проветривания, мин.	Объем выделившегося газа, м³	Объем выброшенной породы, м³	Барометрическое давление, мм рт. ст.	Мощность газоносного слоя, м	Мощность газопорного слоя, м	Абсолютная отметка, м	Видимость геологического нарушения	Локализация**
1	15.06.2013								-790	0	
2	01.11.2013								-790	0	
3*	04.12.2013	4,0	7			728			-791	0	
4	30.03.2015	5,0	15	372,0	6,0	718	0,5	0,9	-813	0	ПК
5	05.09.2015					727			-790	0	
6	12.04.2017	5,0	30	150,0	0,4	710	0,4	0,1	-809	1	ПК
7	07.05.2017	0,5	5	992,0	16,0	716	1,8	0,4	-811	1	П
8	17.06.2017	5,0	30	230,0	42,6	724	2,0	1,1	-813	1	П
9	27.06.2017	5,0	15	4249,0	475,0	722	3,4	1,1	-814	1	П
10	05.09.2017	0,5	6	195,9	1,5	714	1,7	0,6	-814	1	П
11	27.10.2017	7,6	18	452,9	5,5	725	3,0	0,2	-815	0	П
12	09.11.2017								-814	0	
13	15.11.2017	4,0	26	408,9	5,6	729	1,8	0,4	-816	0	ПК
14	20.11.2017	2,6	37	336,2	82,1	719	2,4	1,3	-814	0	ПК
15	25.11.2017	4,5	35	487,5	78,4	725	2,4	1,6	-815	0	ПК
16	04.02.2018	5,0	57	1432,9	52,0	737	1,8	1,3	-825	0	К
17	26.02.2018	3,3	21	140,8	64,8	734	1,8	0,2	-824	0	К
18	07.03.2018	31,8	344	2013,1	180,0	731	1,8	0,2	-818	0	К
19	11.04.2018	67,5	80	7433,0	409,0	732	3,5	2,2	-823	0	К
20	04.06.2020	3,3	10		16,0		2,4		-820	0	К
21	05.06.2020	4,5	30		11,1		2,5		-820	0	К
22	07.06.2020	1,7	39		13,2		2,3		-820	0	К
23	10.06.2020	3,2	42		82,3		2,0		-816	0	П
24*	12.06.2020	5,5	17	264,3	80,8		2,4		-827	0	К
25*	10.08.2020	4,2	15	85,3	84,0		2,1		-822	0	К
26*	04.09.2020	4,2	15	124,2	28,0		3,1		-835	0	К

27*	16.11.2020	5,4	53	118,5	66,0		2,7	0,2	-812	1	К
28	18.01.2022	24,0	22		225,0		3,2		-865	0	ПК
29	26.04.2022	18,4	70	1653,4	336,0		2,5	0,7	-875	1	П
30*	07.05.2022	28,0	35				2,5	0,7	-873	0	П
31	11.05.2022	28,0	16		176,4		2,5	0,7	-875	0	П
32	23.06.2022	0,8	53		37,0		2,3	1,0	-875	1	П
33*	12.10.2022	1,4	14		17,0		2,0	1,3	-890	1	К
34*	11.12.2022	0,6	1		40,0		1,8	2,8	-857	0	П
35	05.01.2023	1,9	55		238,0		2,2	0,4	-900	0	ПК
36	14.01.2023	4,8	30		162,5		2,5	0,4	-900	0	ПК
37	31.03.2023	7,6	30	566,4	104,0		3,1		-909	1	К
38	06.04.2023	0,7	30	13,0	104,0		3,1		-910	1	К
39	08.04.2023	2,9	30	298,0	104,0		3,1		-910	1	К
40	09.04.2023	2,1	30	5,0	104,0		3,1		-910	1	К
41	13.04.2023	0,1	30	32,0	104,0		3,1		-910	1	К
42	15.04.2023	0,1	30	21,0	104,0		3,1		-910	1	К
43	16.04.2023	5,0	30	365,0	104,0		3,1		-910	1	К
44	18.04.2023	0,2	30	8,1	104,0		3,1		-911	1	К
45*	13.08.2023	3,2	28	231,0	87,0		3,5		-905	1	ПК
46*	13.09.2023	1,0	3	50,3	115,0		3,0		-907	1	К
47*	23.09.2023	6,4	27	36,1	104		0,5		-923	1	К
Варнация, %		163	162	201	585	1	32	79	5	-	-
* Отмечены события, квалифицированные как вывал породы.											
** Локализация: П – почва; К – кровля; ПК – почва и кровля.											





Рисунок 3.3 — Образцы пород из выбросоопасных пластов доломитов

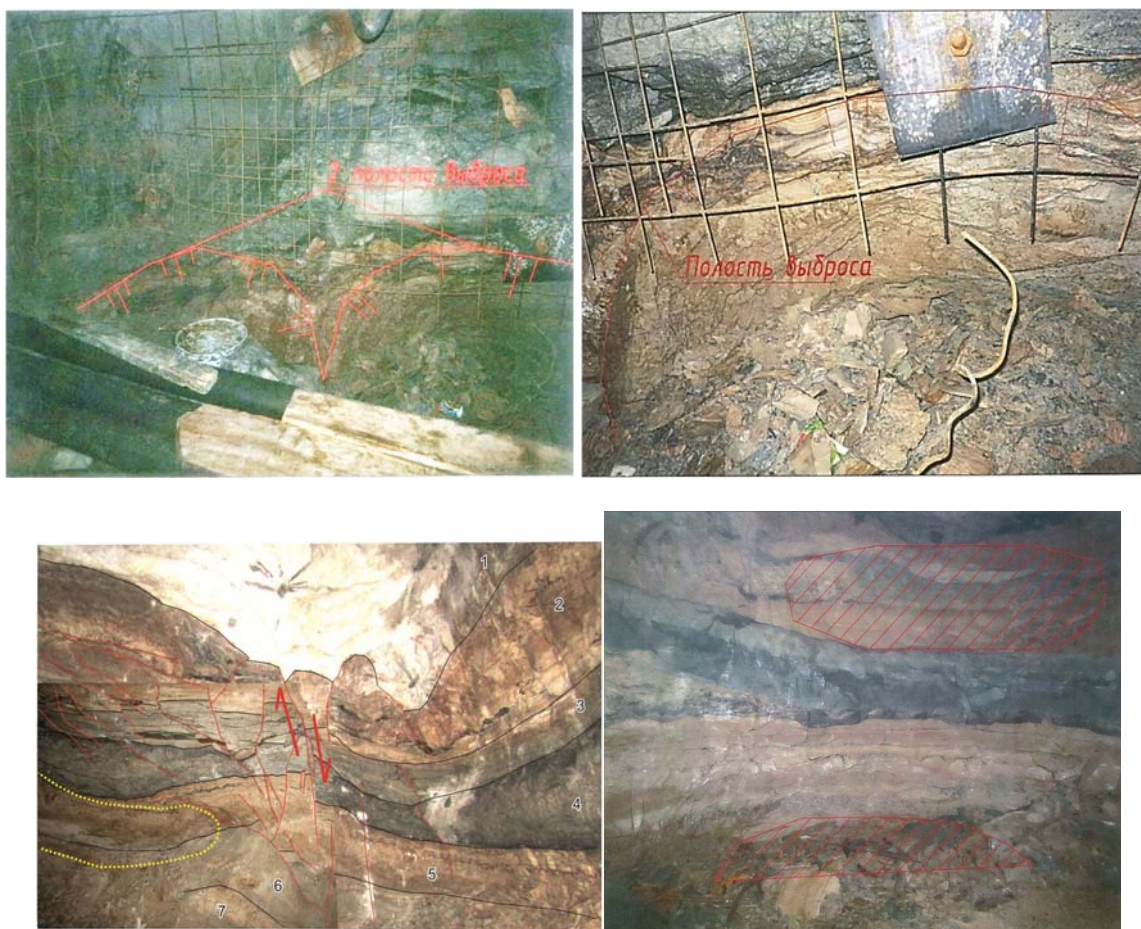


Рисунок 3.4 —Примеры полостей выброса

В большинстве отчетов фигурируют слои и прослой из **глинистых доломитов**, глинистых доломитов **ангидритов** и **глинистых** бурых красных плотных **мергелей**, которые характеризуются как газоупоры. Мощность этих слоев варьируется от 0,2 до 3,0 м [50].

В зоне работ регулярно обнаруживались геологические нарушения, в которых породы имеют низкую крепость, высокую трещиноватость, перемяты и деструктурированы.

Практически с первых инцидентов упоминается важный признак газодинамического происхождения выброса, а именно **наличие зоны отрыва в виде полусферической или полуэллиптической полости, в которой породы раздроблены до песчано-дресвяной фракции**, наблюдаются мелко-плитчатые отслоения и шелушение (рисунок 3.4) [50].

Для таких полостей отмечалось взаимное положение забоя, газоносных слоев и локализация полости выброса — почва, кровля, по всей высоте забоя, а также грудь забоя или борт (рисунки 3.5–3.11) [50].

С 2020 года наличие полости выброса и расстояние, на которое была отброшена порода, стали основным признаком газодинамического явления. Соответственно часть событий по этим признакам квалифицировалась как вывал породы, ослабленной буровзрывными работами [50].

Из сопутствующих событий следует отметить зафиксированные сбои системы передачи данных автоматизированного газового контроля (отмечены в 2022 году 18.01, 07.05 и 11.05). Вследствие чего возникли и отмечены в актах сомнения в корректности показаний концентрации метана. По этой же причине в отчетах с 18.01.2022 по 14.01.2023 отсутствуют рассчитанные объемы выделившегося газа.





Рисунок 3.5 — Газовый суфляр на контакте кимберлитовой жилы и каменной соли



Рисунок 3.6 — Система диагональных приконтактных трещин в кимберлите, залеченных  
оранжевым галитом

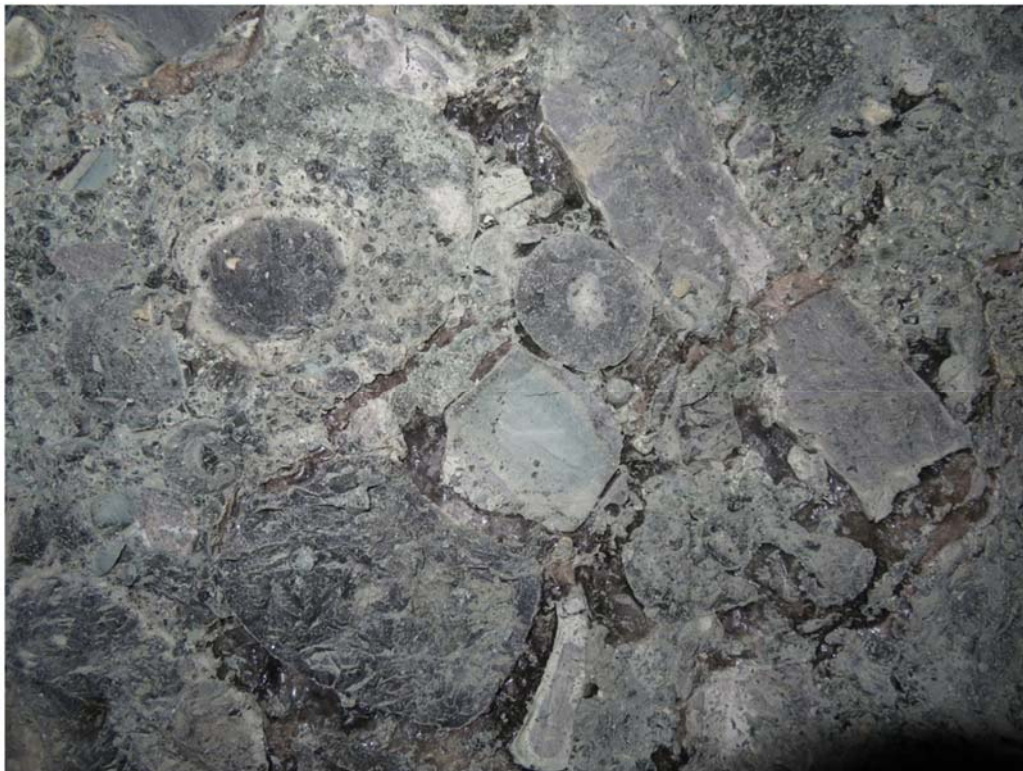


Рисунок 3.8 — Галитовый цемент автолитовой брекчии

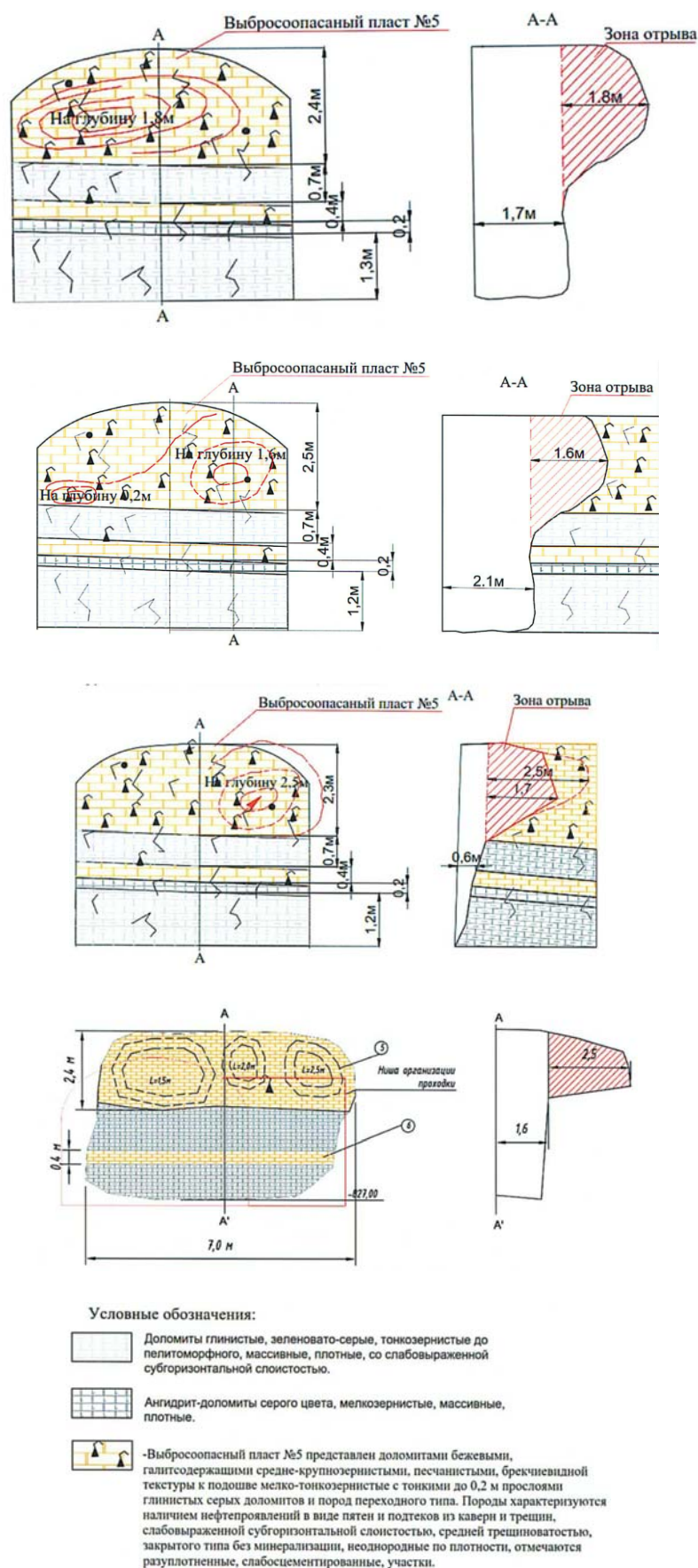


Рисунок 3.8 — Схемы забоя из актов осмотра серии выбросов в июне 2020 г.:  
геология и геометрия выброса



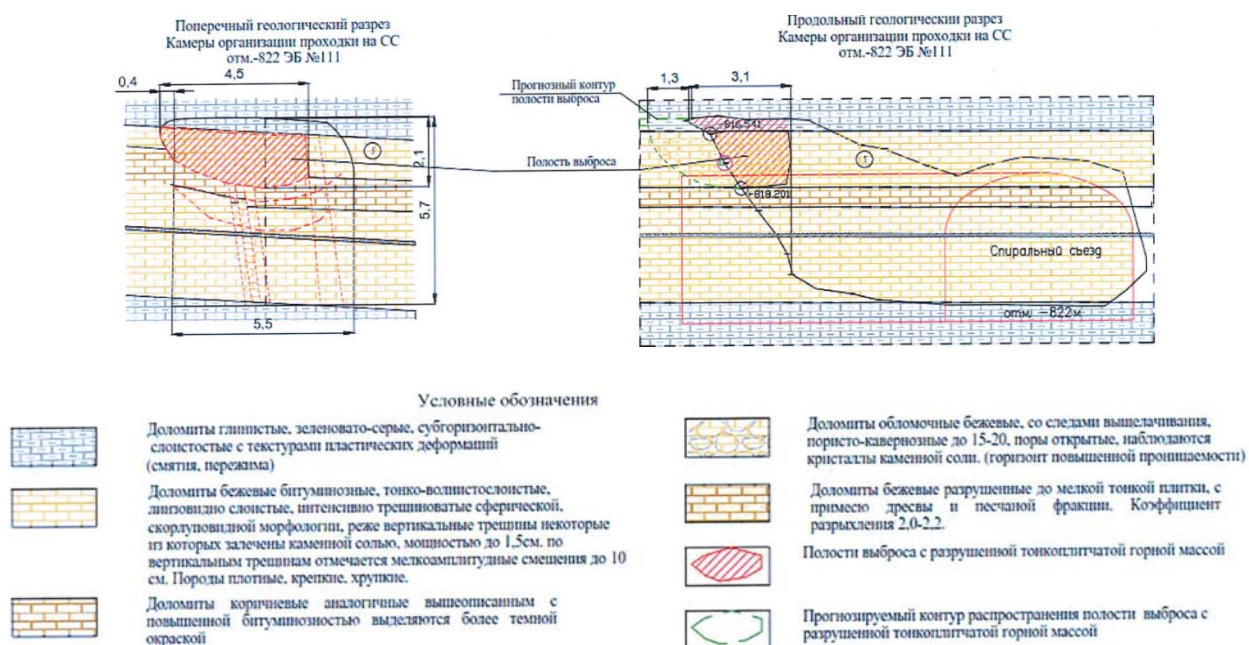


Рисунок 3.9 — Схема забоя из акта осмотра после выброса от 10.08.2020:  
геология и геометрия выброса

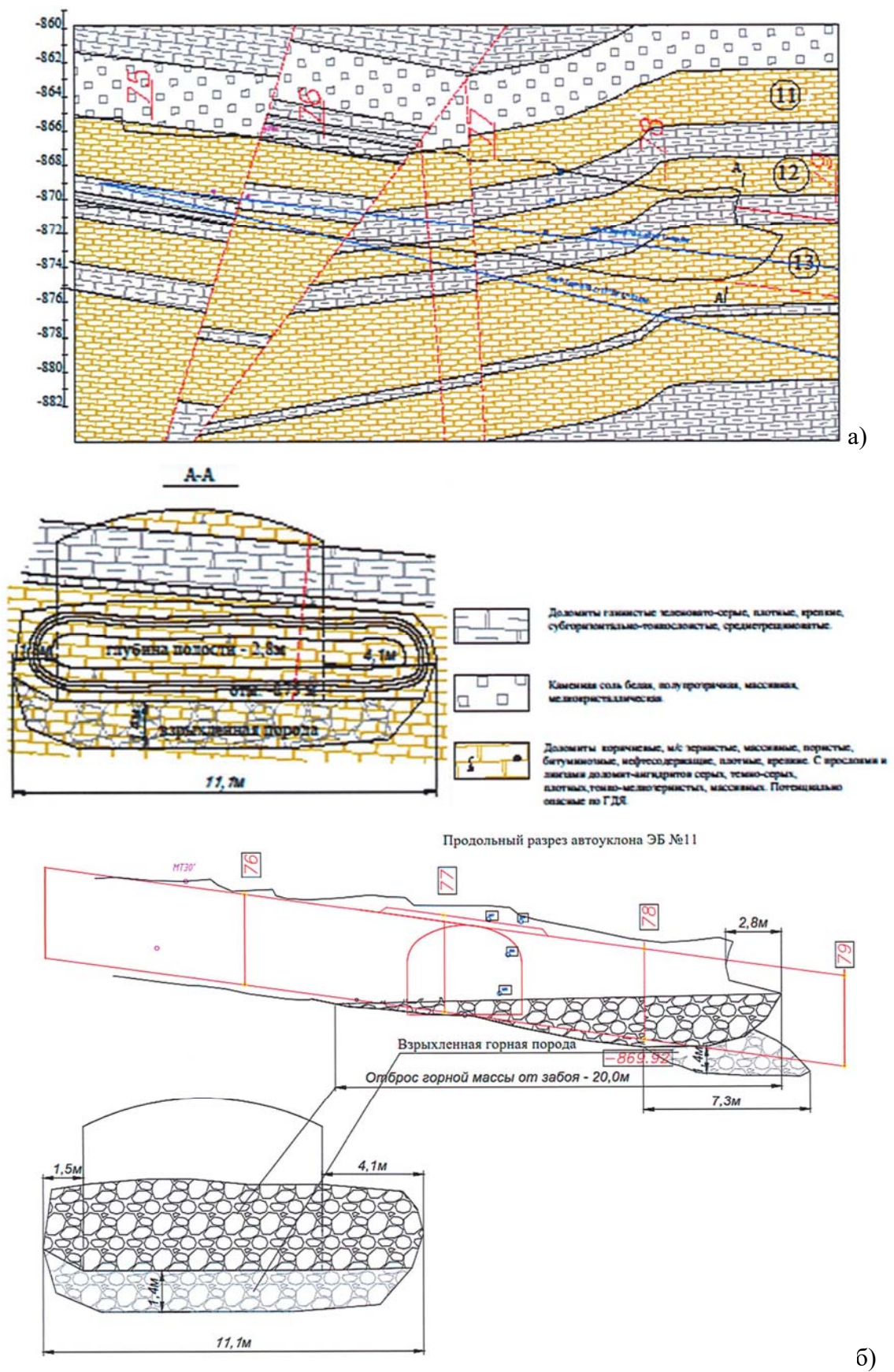
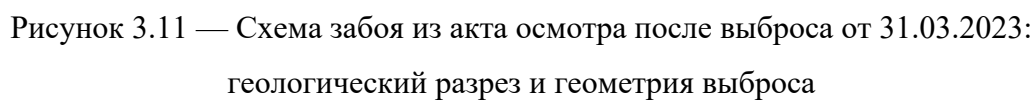


Рисунок 3.10 — Схема забоя из акта осмотра после выброса от 26.04.2022:

а) геологический разрез; б) геометрия выброса





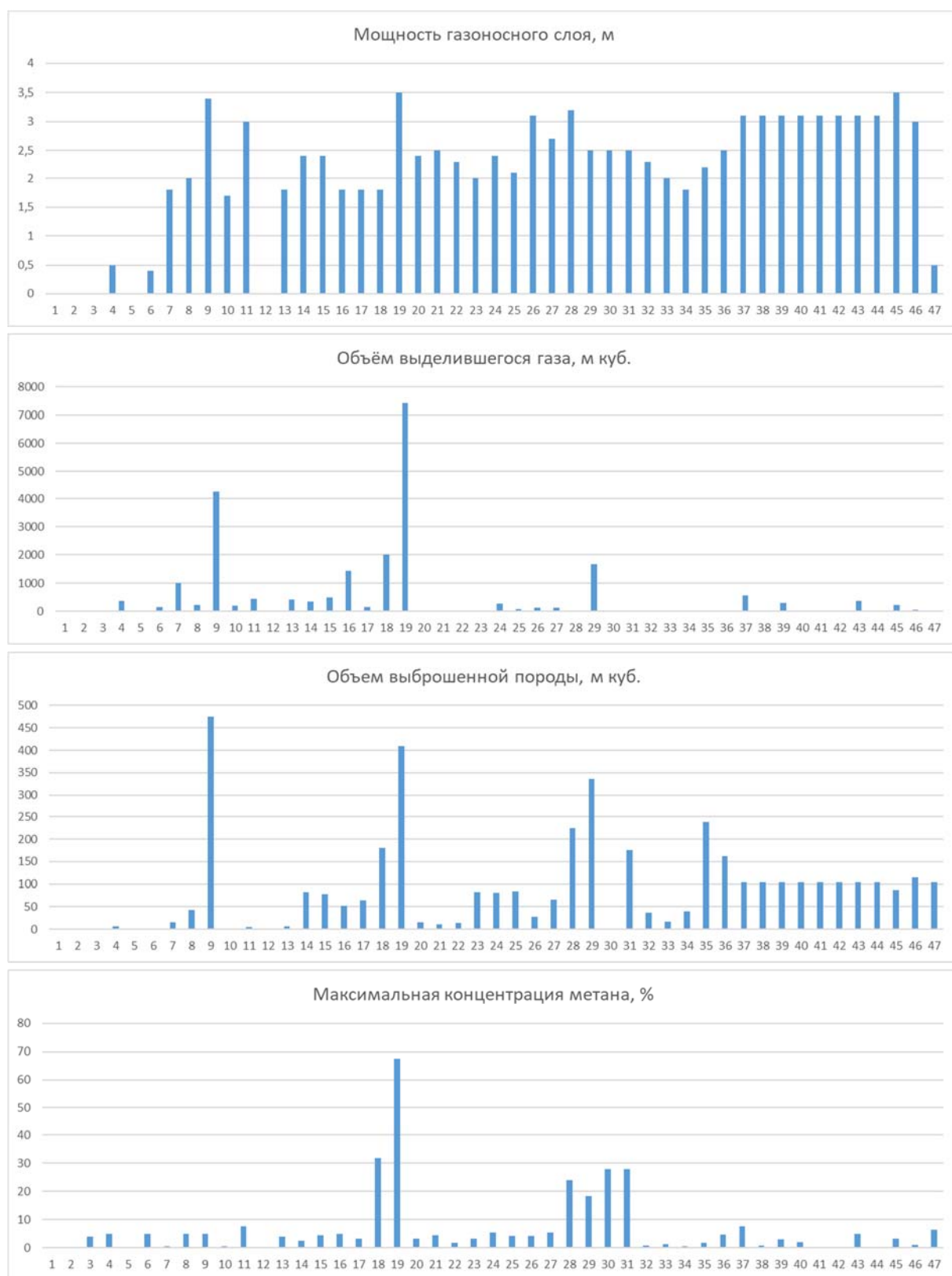


Рисунок 3.12 — Показатели выбросов на руднике «Интернациональный» за 2013–2023 гг.

С 2020 г. классификация событий на руднике основывается на морфологии полости выброса и дальности вылета разрушенной породы. Это позволило переквалифицировать ряд инцидентов из категории ГДЯ в категорию вывалов горной массы, вызванных потерей устойчивости массива под воздействием БВР [50].

На рисунке 3.12 приведены данные о показателях выбросов: максимальная концентрация метана, %; объем выделившегося газа, м<sup>3</sup>; объем выброшенной породы, м<sup>3</sup>; мощность газоносного слоя (слоя-источника) (м) [50].

### **3.3 Анализ показателей выбросов пород и газа**

В 2017–2018 гг. участвовавшие инциденты с выбросами породы и газа потребовали дополнительных мер по обеспечению безопасности работ. Для их разработки события стали тщательно документироваться, что позволило собрать представительный набор описаний и числовых характеристик [50].

Важное свойство последовательностей событий – это их локализация на поле рудника. На рисунке 65 проявляется определенная система: события размещаются компактно, кластерами, и проявились на участке проведения наклонного кольцевого съезда на участках геологических нарушений.

Также просматривается интересный и понятный эффект перемещения полости выброса с почвы на кровлю по мере углубления выработки и прорезания газоносного слоя. Особенно ярко это проявляется в серии событий № 7–19 в 2017–2018 годах.

Со статистической точки зрения обращает на себя внимание существенное различие вариации<sup>2</sup> показателей, особенно собственных характеристик событий: максимальной концентрации метана в забое,

---

<sup>2</sup> Используется стандартное определение: отношение стандартного отклонения ряда значений к его среднеарифметическому значению, представленное в %.

продолжительности загазирования, оценок объема выделившегося газа и выброшенной породы (162...585 %) [50].

На их фоне толщина газоносного и газупорного слоев, которые воспринимаются как природная основа, и потенциал событий (32 и 79 % соответственно) выглядят более консолидированными, но также неоднородными. Это объясняется тем, что события привязаны к участкам с различным геологическим строением [50].

Остальные характеристики — барометрическое давление и отметка — с вариацией до 10 % на фоне остальных можно считать близкими к константам.

Исследование тесноты связей показателей в данных по выбросам, ввиду их очевидной неоднородности, проведено с использованием коэффициента Кендалла ( $\tau$ )<sup>3</sup>, а для оценки возможности использования линеаризованного представления для всех пар показателей и характеристик также определен стандартный коэффициент корреляции Пирсона<sup>4</sup> (таблица 3.5).

Поскольку оба коэффициента нормированы в диапазоне [-1; 1] и симметричны относительно перестановки векторов данных, то для наглядности они совмещены в одну таблицу — выше главной диагонали помещены коэффициенты Кендалла, а ниже — коэффициенты корреляции Пирсона.

В целом сравнивая значения коэффициентов для каждой пары показателей, можно утверждать, что линейный и нелинейный подходы не противоречат друг другу. Но из-за малого размера выборки и пробелов в данных теснота нелинейной связи заметно хуже. Также для получения **верхних границ** ожидаемых объемов выбросов и максимальной концентрации от геологических условий (мощности слоев) можно использовать линейный подход.

---

<sup>3</sup> <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.mstats.kendalltau.html#kendalltau>

<sup>4</sup> <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.pearsonr.html#pearsonr>

Таблица 3.5 — Коэффициенты Кендалла и корреляции Пирсона показателей и характеристик внезапных выбросов [50]

Показатели и характеристики	Максимальная концентрация метана, %	Время проветривания, мин.	Объем выделившегося газа, м <sup>3</sup>	Объем выброшенной породы, м <sup>3</sup>	Барометрическое давление, мм рт. ст.	Мощность газоносного слоя, м	Мощность газупорного слоя, м	Абсолютная отметка, м
Максимальная концентрация метана, %		0,500086	0,574173	0,351912	0,486003	0,496989	0,077703	-0,442390
Время проветривания, мин.	0,481283		0,272727	0,418182	0,477084	0,121967	0,266970	-0,509797
Объем выделившегося газа, м <sup>3</sup>	0,836296	0,194277		0,490909	0,183494	0,406558	0,266970	-0,094407
Объем выброшенной породы, м <sup>3</sup>	0,603234	0,198486	0,887763		0,183494	0,487869	0,266970	-0,094407
Барометрическое давление, мм рт. ст.	0,405334	0,368565	0,255580	0,158302		0,061546	-0,019245	-0,933715
Мощность газоносного слоя, м	0,489207	-0,154319	0,717437	0,751775	0,000350		0,319801	0,042220
Мощность газупорного слоя, м	0,489714	-0,141022	0,628647	0,533222	0,128166	0,552487		0,000000
Абсолютная отметка, м	-0,438902	-0,212690	-0,311278	-0,167768	-0,890682	0,022090	-0,253226	

Попарную интерпретацию полученных значений коэффициентов естественно сделать, отталкиваясь от геологической основы событий — мощности газоносного слоя. Этот показатель хорошо объясняет объемы выделившегося газа и выброшенной породы.

Мощность газупорного слоя удовлетворительно объясняет объемы выделившегося газа и выброшенной породы. Это более слабый фактор, отвечающий не столько за показатели выброса, сколько за возможность его возникновения [50].

Максимальная концентрация метана в качестве индикатора систем газового контроля проявляется как вторичный и многосвязный показатель. Он лучше коррелирует с объемами выделившегося газа и выброшенной породы. Потеря коррелированности в последовательности «мощность газоносного слоя — объем выделившегося газа — максимальная концентрация метана» может быть следствием отмеченных в отчетах проблем с системой автоматизированного газового контроля.

Следующий в ряду удаленности по связности с мощностью газоносного слоя показатель – это время проветривания. Оно лучше всего, на удовлетворительном уровне, объясняется максимальной концентрацией метана [50].

Барометрическое давление и абсолютная отметка оценивались в предположении возможного их влияния на время проветривания и для подтверждения корректности других вычислений. Эти показатели ожидаемо составили выраженную автономную пару с очень тесной связью ( $\rightarrow -0,9$ ).

Ниже на рисунках 3.13–3.16 представлены схемы некоторых зафиксированных газодинамических явлений с зонами выбросов в боках, почве и груди забоя.

В предположении, что объемы выбросов связаны со вскрытием неразгруженных слоев и коллекторов газа, проведено статистическое исследование их показателей в группах по локализации выбросов. Для этого вычислены статистические характеристики объемов выбросов в почве, кровле и по высоте забоя (почва-кровля) (таблица 3.6) и проведены парные статистические тесты на равенство средних и дисперсий (таблица 3.7) [50].

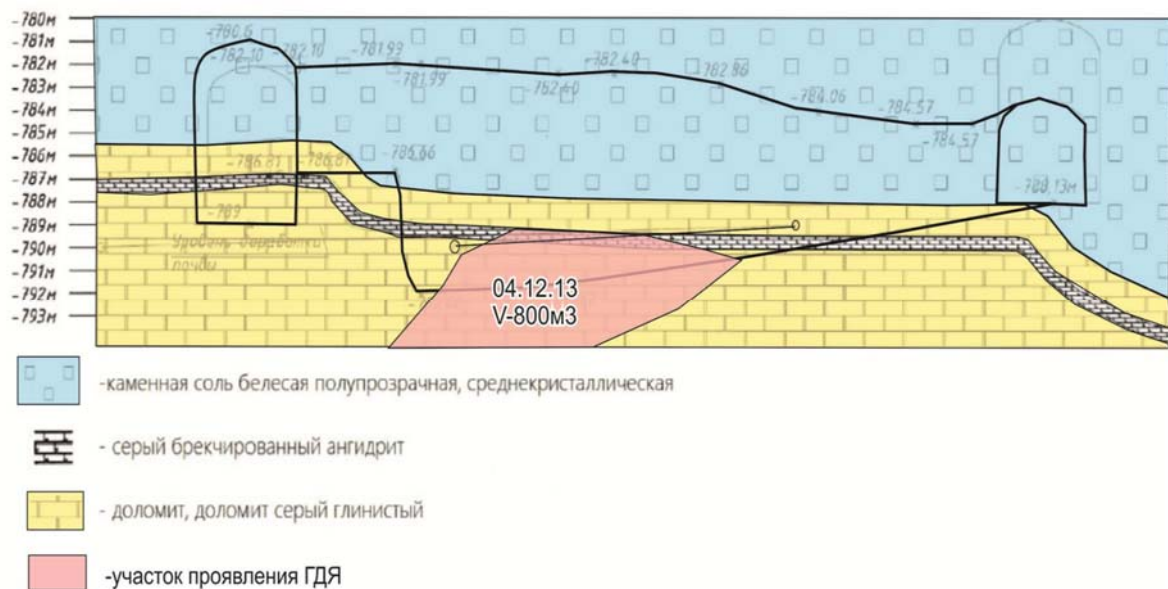


Рисунок 3.13 — Геологический разрез через водосборник забойной станции водоотлива № 2 (рудник «Интернациональный», отм. -791 м)

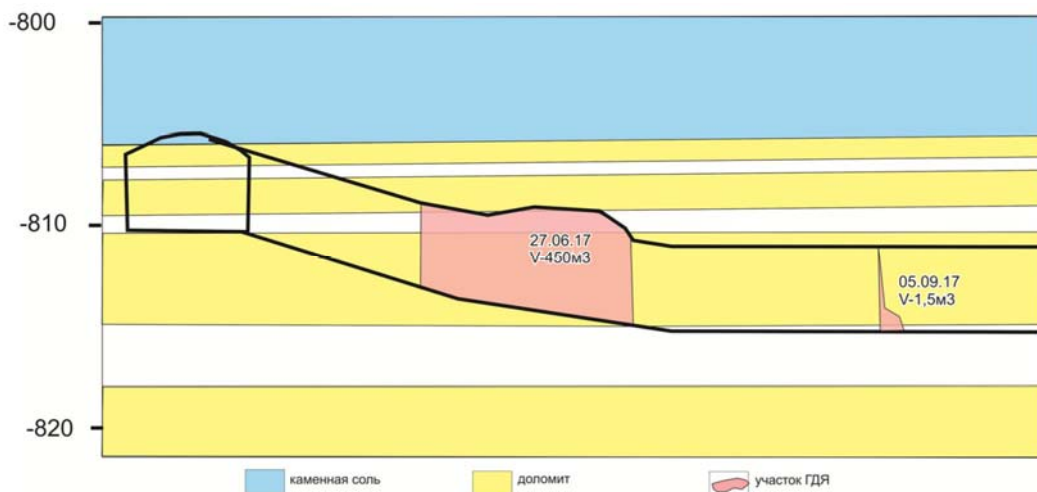


Рисунок 3.14 — Разрез через автоуклон, отм. -799 / -840 м, с двумя случаями проявления газодинамических явлений в виде выбросов породы и газа

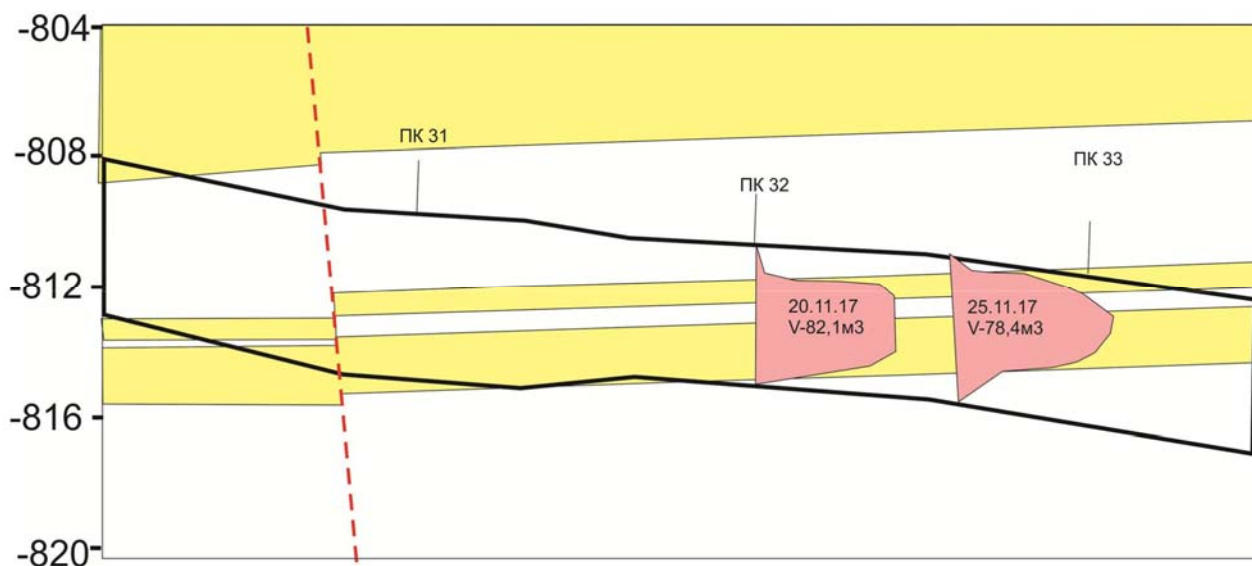


Рисунок 3.15 — Разрез через автоуклон, отм. -799 / -860 м

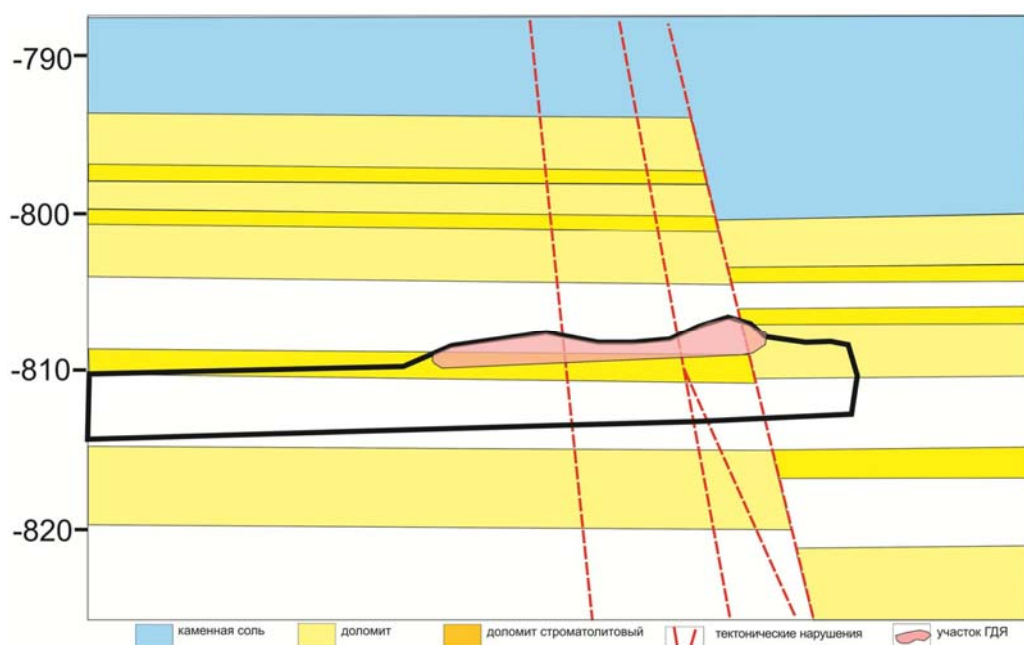


Рисунок 3.16 — Разрез через закладочный орт, вскрывший очаг газодинамического явления вблизи контакта с кимберлитовой трубкой

Таблица 3.6 — Статистические характеристики объемов выбросов в группах по локализации

Локализация	Объем выброшенной породы, м <sup>3</sup>		Объем выделившегося газа, м <sup>3</sup>	
	Среднее	Стандартное отклонение	Среднее	Стандартное отклонение
Почва	146,1	188,2	1295,5	1414,1
Почва-кровля	43,2	39,4	330,9	111,8
Кровля	112,0	78,2	722,6	1710,0

Таблица 3.7 — Оценка равенства статистических характеристик между группами выбросов по локализации

Местоположение	<i>p</i> -значения <i>t</i> -теста по среднему значению (порода/газ)			<i>p</i> -значения теста Левена по дисперсии (порода/газ)		
	Почва	Почва-кровля	Кровля	Почва	Почва-кровля	Кровля
Почва	—	0,18814	0,46671	—	0,10758	0,68082
Почва-кровля	0,28124	—	0,36120	0,22867	—	0,41923
Кровля	0,70734	0,01683	—	0,06071	0,90342	—

Равенство средних оценивалось по *t*-критерию Стьюдента<sup>5</sup>, а равенство дисперсий – по критерию Левена<sup>6</sup>. В таблице 28 представлены *p*-значения базовой гипотезы ( $H_0$ ) о равенстве средних и дисперсий в группах по локализации событий: если  $p < \alpha$ , то базовая гипотеза отвергается. Уровень значимости  $\alpha$  ввиду малого размера выборки адекватно принять равным 0,1. Под главными диагоналями помещены тесты для объема выброшенной породы, а над ними — для объема выделившегося газа [50].

Из таблицы 27 видно, что средние объемы выброшенной породы и выделившегося газа при локализации в почве кратно превосходят выбросы при локализации по всей высоте забоя и на 40–60 % превосходят выбросы при локализации в кровле. Однако гипотеза о равенстве значимо отвергается только по объему выброшенной породы в парах «почва-кровля – кровля» для среднего значения и «почва – кровля» для дисперсии (таблица 28).

Следовательно, предположение о том, что выбросы из почвы превосходят по объему другие локализации, имеет слабое статистическое подтверждение. Но хорошо подтверждается отличие выбросов из почвы по дисперсии объема выброшенной породы [50]. *Такое перекрестное подобие (или отличие) трех распределений указывает на три характерные ситуации*

<sup>5</sup> [https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.ttest\\_ind.html#scipy.stats.ttest\\_ind](https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.ttest_ind.html#scipy.stats.ttest_ind)

<sup>6</sup> <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.levene.html>



*формирования выброса: много-мало ослабленной породы и много-мало задействованного газа. Комбинация мало породы и мало газа, очевидно, не рассматривается как происшествие и не попадает в статистику.*

### **3.4 Исследование напряженно-деформированного состояния горного массива в условиях рудника «Интернациональный»**

Для оценки достоверности результатов численного моделирования проведены инструментальные измерения направления и величин природного поля напряжений в геомассиве. Для решения этой научной задачи методом скважинной частичной разгрузки проведено измерение напряжений в забое подготовительной выработки [42, 162].

Работы при скважинной частичной разгрузке выполняются в два этапа. Первый этап проводится с целью определения деформаций пород в массиве при разгрузке.

План расположения спирального съезда ЭБ № 11, а также его сечение, с указанием места проведения измерений и нанесением полученного вектора главных напряжений, представлено соответственно на рисунках 3.17 и 3.18.

После регистрации базисных показаний выполняется бурение скважины с последующим снятием контрольных замеров с индикаторов часового типа [80]. Величина частичной разгрузки массива вычисляется как разность между результатами первичных и повторных измерений по соответствующим приборам (таб. 3.8).

Разгрузочная скважина выбуривалась 26.01.2020 в забое спирального съезда по выбросоопасному пласту бежевого доломита, занимающего более половины сечения выработки, на высоте 1,5 м от почвы выработки и в 3 м от левого бока выработки. Средняя крепость данного пласта, полученная в результате испытаний образцов прибором БУ-39, составляет  $f = 6,1-6,7$ . Время выбуривания разгрузочной скважины составило 1 час.

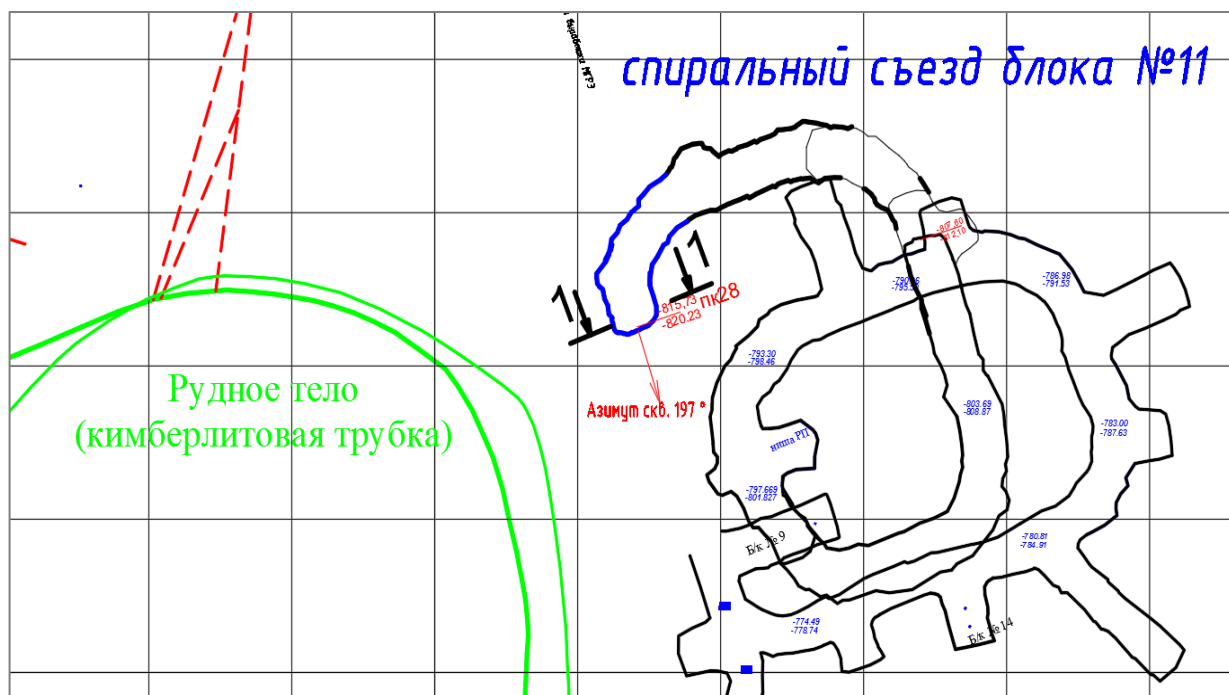


Рисунок 3.17 — План расположения спирального съезда ЭБ № 11

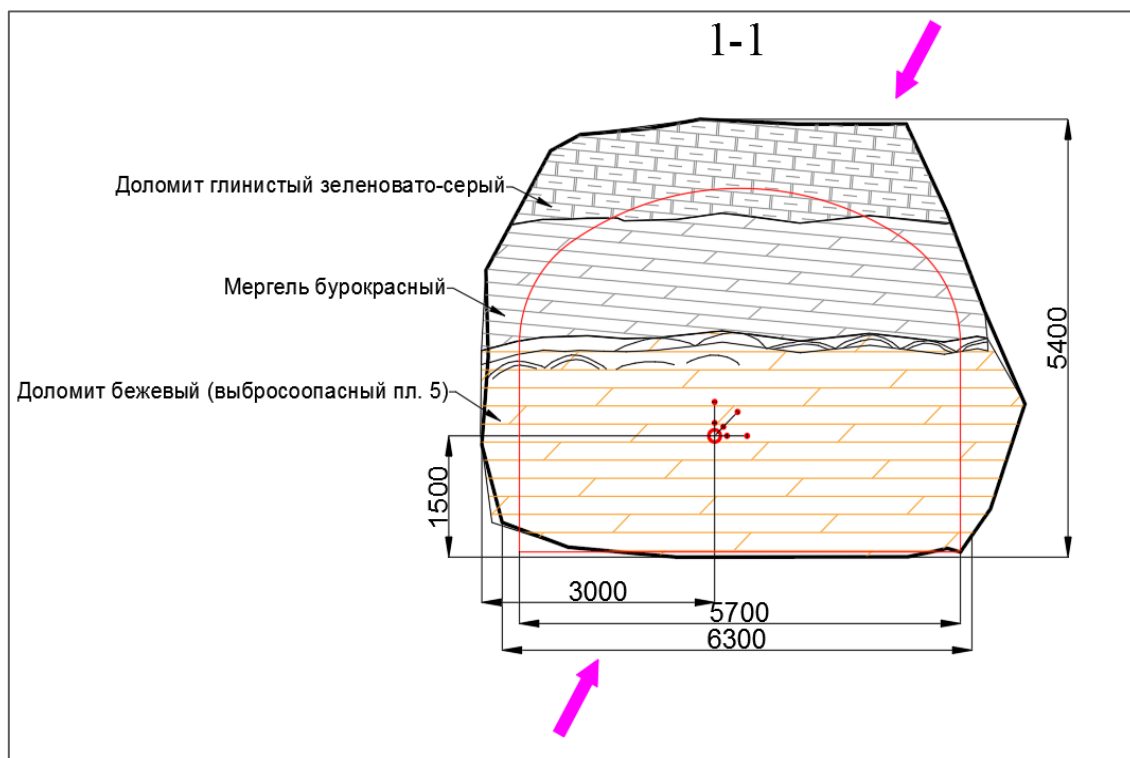


Рисунок 3.18 — Сечение забоя спирального съезда ЭБ № 11 (фиолетовые стрелки показывают направление повышенных напряжений)

Азимут направления проведения выработки совпадает с азимутом направления бурения скважины и составляет  $197^{\circ}$ . В правом боку выработки присутствует вывал по данному пласту на глубину около 1 м. Забой выработки, в месте выбуривания скважины, представляет собой практически ровную поверхность, однако в кровле рассматриваемого пласта бежевого доломита, представленной мергелем, очень трещиноватым, присутствует отжим. Высота выработки составляет 5,4 м, ширина 6,3 м [57]. Бока выработки неровные, закреплены, как и кровля, анкерной крепью.

Таблица 3.8 – Результаты замеров смещений массива при частичной скважинной разгрузке в забое спирального съезда

Время после разгрузки, мин.	Отсчеты по индикаторам, мм, по направлениям		
	вертикальному	горизонтальному	диагональному
0	0,041	0,012	0,032
10	0,047	0,016	0,037
30	0,047	0,015	0,039

Далее выполнялись расчеты модуля упругости (Юнга) и коэффициента Пуассона породы, необходимые для расчета напряжений. Для этого в скважину устанавливается специальный домкрат и проводится циклическое нагружение краевой части скважины с помощью гидравлического насоса до полного разрушения породы. При каждом цикле нагружения записываются в полевом журнале отсчеты по манометру и индикаторам часового типа. Было проведено нагружение скважины домкратом сначала в вертикальной (таблица 3.9), а затем в горизонтальной плоскости (таблица 3.10).

Обработка результатов эксперимента осуществлялась в компьютерной программе, разработанной на кафедре геотехнологии СибГИУ. Сначала проводится анализ таблиц 3.9 и 3.10 и определяется модуль деформации, который по мере нагружения изменяется. При смещении репера 5

относительно репера 6 на 0,006 мм модуль деформации, после построения диаграммы «напряжение – деформация», получен  $E_d = 16581$  МПа.

Таблица 3.9 — Распор домкрата по вертикальной оси и отсчеты по индикаторам часового типа

Давление по манометру, бар/МПа	Показатели индикатора по вертикали, мм	Показатели индикатора по горизонтали, мм	Показатели индикатора по диагонали, мм
0/0	0,048	0,015	0,039
50/5	0,048	0,015	0,039
100/10	0,048	0,015	0,039
150/15	0,048	0,015	0,039
200/20	0,048	0,015	0,038
250/25	0,050	0,015	0,038
300/30	0,050	0,015	0,038
350/35	0,052	0,015	0,037
400/40	0,054	0,015	0,037

Таблица 3.10 — Распор домкрата по горизонтальной оси и отсчеты по индикаторам часового типа

Давление по манометру, бар/МПа	Показатели индикатора по вертикали, мм	Показатели индикатора по горизонтали, мм	Показатели индикатора по диагонали, мм
0/0	0,050	0,015	0,037
50/5	0,050	0,016	0,043
100/10	0,049	0,016	0,043
150/15	0,049	0,016	0,043
200/20	0,049	0,017	0,045
250/25	0,049	0,017	0,047
300/30	0,049	0,017	0,048
350/35	0,049	0,017	0,049
400/40	0,049	0,017	0,051

Для этого модуля и данных таблицы 3.9 получены следующие величины главных напряжений:

$$\sigma_1 = 3,1 \text{ МПа};$$

$$\sigma_2 = 1,3 \text{ МПа};$$

$$\phi = 29^\circ.$$

Таким образом, в подготовительном забое спирального съезда максимальное нормальное напряжение равно 3,1 МПа и направлено по линии, наклоненной от вертикальной оси слева под углом  $29^\circ$ , то есть со стороны очистных горных выработок. Минимальное главное напряжение получено 1,3 МПа. Следует отметить, что величины напряжений примерно на порядок меньше вычисленных методом конечных элементов, а также меньше рассчитанной для этой глубины (1220–1240 м от поверхности) величины напряжений, равной  $\sigma_Z = \sigma_Y = \sigma_X = \gamma H$ ;  $\sigma_{Z.X.Y} = 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot 1220 = 32 \text{ МПа}$ .

На основании рассмотренных данных установлено, что опыт проведен в разгруженной зоне под влиянием указанных зон ослабления породного массива, то есть проведено измерение остаточных напряжений.

Данное обстоятельство объясняется тем, что в настоящее время ведение взрывных работ, при проведении спирального съезда ЭБ № 11 и автоуклона в условиях рудника «Интернациональный», осуществляется в два этапа. На первом этапе проводится сотрясательное взрывание шпуров по контуру выработки в режиме камуфлета. В результате чего осуществляется разгрузка массива на глубину 2,7 м. На втором этапе осуществляются БВР, направленные на отбойку горной массы и продвижение выработки по уходу, на длину 1,7 м. После осуществления крепления выработки и других необходимых процессов проводится повторение этапов 1 и 2. То есть проведение спирального съезда ЭБ № 11 и автоуклона осуществляется с постоянным опережением разгрузки массива, в сторону забоя, на глубину 1,0 м. Кроме того, при проведении первого этапа БВР (взрывание контурных зарядов) также разгружается массив со стороны почвы, кровли и боков выработки на глубину 2 м. Таким образом, проведение подобных

исследований (на небольшой глубине от обнажения массива) возможно только в разгруженной зоне, с измерением только лишь остаточных напряжений.

В забое автоуклона разгрузочная скважина выбуривалась 23.01.2020 по породам кровли выбросоопасного пласта бежевого доломита, представленным мергелем, на высоте 1,5 м от почвы выработки и в 1,8 м от правого бока выработки. Средний коэффициент крепости пласта составляет, по шкале проф. М. М. Протоdjаконова,  $f = 5,5$ . Время выбуривания разгрузочной скважины составило 1 час. Азимут направления проведения выработки совпадает с азимутом направления бурения скважины и составляет  $190^\circ$ . В 2 м от забоя, в кровле выработки, присутствует купол высотой 2–2,8 м, образовавшийся в результате ГДЯ в 2018 году. Забой выработки неровный, однако в месте бурения скважины был приведен в практически ровную поверхность. Высота выработки составляет 5,0 м, ширина 6,0 м. Бока выработки неровные, закреплены, как и кровля, анкерной крепью.

План расположения автоуклона, а также его сечение, с указанием места проведения измерений и нанесения полученного вектора главных напряжений, представлены соответственно на рисунках 3.19 и 3.20, результаты замеров представлены в табл. 3.11.

Таблица 3.11 — Отсчеты по индикаторам часового типа при частичной разгрузке массива горных пород скважиной

Время после разгрузки, мин.	Отсчеты по индикаторам, мм, по направлениям		
	вертикальному	горизонтальному	диагональному
0	0,020	0,042	0,041
20	0,020	0,071	0,041
40	0,032	0,071	0,041

Работы на втором этапе опыта проведены с целью определения модуля упругости и коэффициента Пуассона породы, необходимых для расчета напряжений. Для этого в скважину устанавливается специальный домкрат и

проводится циклическое нагружение краевой части скважины с помощью гидравлического насоса до полного разрушения породы.

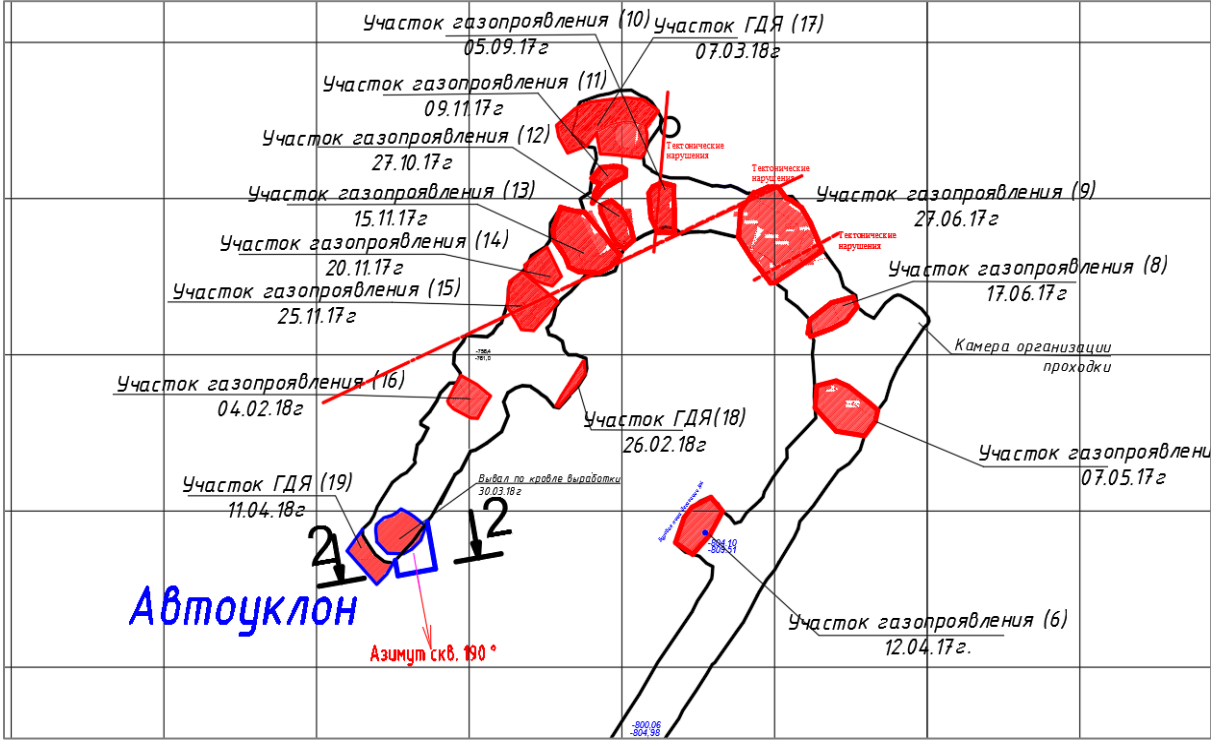


Рисунок 3.19 — План расположения автоуклона

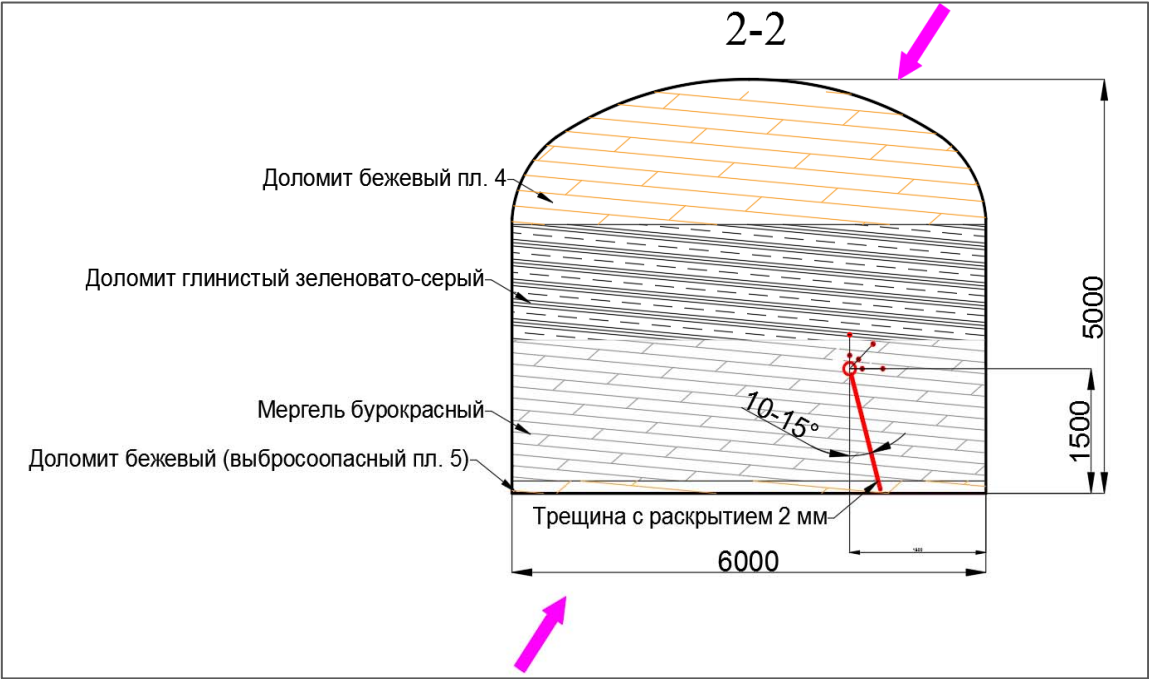


Рисунок 3.20 — Сечение забоя автоуклона (фиолетовые стрелки показывают направление повышенных напряжений)

При каждом цикле нагружения записываются в полевом журнале отсчеты по манометру и индикаторам часового типа. Было произведено нагружение скважины домкратом сначала в вертикальной (таблица 3.12), а затем в горизонтальной плоскости (таблица 3.13).

Таблица 3.12 — Распор домкрата по вертикальной оси и отсчеты по индикаторам часового типа

Давление по манометру, бар/МПа	Показатели индикатора по вертикали, мм	Показатели индикатора по горизонтали, мм	Показатели индикатора по диагонали, мм
0/0	0,032	0,071	0,041
100/10	0,040	0,071	0,042
200/20	0,052	0,082	0,056
300/30	0,068	0,088	0,068
350/35	0,074	0,093	0,076
400/40	0,082	0,098	0,08

Таблица 3.13 — Распор домкрата по горизонтальной оси и отсчеты по индикаторам часового типа

Давление, бар	Показатели индикатора по вертикали, мм	Показатели индикатора по горизонтали, мм	Показатели индикатора по диагонали, мм
0	0,050	0,095	0,067
100	0,050	0,095	0,067
200	0,052	0,095	0,068
300	0,056	0,095	0,069
350	0,059	0,095	0,07
400*	0,230	0,192	0,158
*При нагрузке 400 бар зафиксировано падение давления на манометре. Кроме того, в забое выработки появилась трещина, уходящая вниз от разгрузочной скважины с отклонением 10–15° от вертикали вправо. Раскрытие трещины составило 2 мм.			



Обработка результатов эксперимента осуществлялась по компьютерной программе, разработанной на кафедре геотехнологии СибГИУ. Сначала проводится анализ таблиц 33 и 34 и определяется модуль деформации, который по мере нагружения изменяется. При смещении репера 5 относительно репера 6 на 0,032 мм модуль деформации, после построения диаграммы «напряжение – деформация», получен  $E_d = 28\,587$  МПа. Для этого модуля получены следующие величины главных напряжений:

$$\sigma_1 = 22,99 \text{ МПа};$$

$$\sigma_2 = 8,59 \text{ МПа};$$

$$\phi = 34^\circ.$$

Таким образом, напряженно-деформированное состояние массива в забое автоуклона характеризуется максимальным напряжением 23 МПа (вектор направлен от выработки к зоне очистных работ под углом  $34^\circ$ ) при минимальном главном напряжении 8,6 МПа [100]. Полученные величины близки к величинам напряжений, где вертикальные напряжения изменяются в пределах 25–35 МПа, а горизонтальные 5–6 МПа. При этом полученная величина вертикальных напряжений 23 МПа также довольно близка по значению к рассчитанной для этой глубины (1220–1240 м от поверхности) величины напряжений, равной  $\sigma_z = \sigma_y = \sigma_x = \gamma H$ ;  $\sigma_{z.x.y} = 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot 1220 = 32$  МПа. Однако горизонтальные напряжения намного меньше расчетных —  $8,6 \text{ МПа} < 32 \text{ МПа}$ . Таким образом, предположение, что на XI горизонте (глубина 1240 м) природное поле напряжения предполагается гидростатическим, является неверным, то есть  $\sigma_z \neq \sigma_y$  и  $\sigma_z \neq \sigma_x$ . В результате отношений горизонтальных напряжений к вертикальным, на данной глубине 1220 м, можно предположить, что коэффициент бокового распора для пород будет равен  $\lambda = 0,37$ .

Стоит отметить, что проведение исследований с помощью способа частичной скважинной разгрузки было аналогичным в спиральном съезде ЭБ № 11 (то есть после двух циклов БВР (цикла разгрузки массива впереди забоя

выработки на глубину 2,7 м и цикла, направленного на отбойку горной массы), когда постоянное опережение зоны разгрузки впереди забоя составляет 1 м). Возможно, на результат повлияло близкое расположение ранее пройденной выработки автоуклона, либо недостаточно эффективно была проведена разгрузка массива взрыванием оконтуривающих выработку шпуров.

### **3.5 Геофизическое исследование НДС горного массива в окрестностях забоев горных выработок в зонах проявления ГДЯ**

На данном этапе развития техники и технологии исследований НДС массивов с положительной стороны зарекомендовали себя геофизические методы оценки состояния горных пород. То есть стали применять для данных работ современные геофизические приборы, позволяющие оперативно и нетрудоемко выполнять процессы оценки и контроля НДС массивов. К таким приборам, в частности, отнесен многофункциональный геофизический прибор ANGEL-M, описание которого довольно подробно дано в Приложении 2.

Необходимо отметить, что на практике хорошо себя зарекомендовал способ, основанный на применении геофизического прибора ANGEL-M с функцией АЭШ, то есть метод исследований НДС с использованием искусственного возбуждения естественных электромагнитных полей с помощью генератора — так называемого ВЭМИ [31, 205].

При проведении горных выработок, в их краевых частях, постоянно происходит перераспределение горного давления, и это перераспределение тем интенсивней, чем интенсивней ведутся горные работы. Особенно остро проблема нестабильного состояния горных массивов возникает при ведении в них горных работ буровзрывным способом. Под действием взрывной волны в массиве происходит постоянное перераспределение и концентрация механических напряжений. Повышенные механические напряжения,

концентрирующиеся как на контуре выработок, так и на незначительном удалении от них, создают в массиве условия для выделения запасенной упругой энергии в разнообразных формах и проявлениях. Если в массиве за счет перераспределения горного давления состояние горных пород не достигло предела прочности на сжатие, то деформирование выработок происходит спокойно и, соответственно, устойчивость краевых частей решается только за счет их своевременного поддержания. В случае, если предел прочности достигнут, возникает серьезный вопрос о возможном характере разрушения: примет ли оно спокойную форму или произойдет динамически в форме внезапного выброса.

Задачи, по объективной оценке, напряженно-деформированного состояния краевых частей горных выработок, прогнозирования процесса перераспределения горного давления в массиве при проведении выработок способом БВР, выявления напряженных зон и степени их напряженности являются до сих пор актуальными.

Вышеперечисленные задачи проявились и при ведении БВР на руднике «Интернациональный». Возрастание глубины горных работ существенно осложнило технологический процесс проведения вспомогательных горных выработок в массиве. Повышенное горное давление не только способствовало формированию условий для разрушения краевых участков горных выработок, но и спровоцировало процессы различного характера внезапных выбросов породы и газа.

В этой связи в данной работе, для решения поставленных задач, были проведены инструментальные наблюдения геофизическими методами ЕЭМИ и ВЭМИ на различных участках: спиральный съезд блока № 11, автоуклон. Наблюдения выполнялись поэтапно, в период с 23.10.2019 по 26.10.2019.

В спиральном съезде наблюдения проводились на различных этапах ведения горных работ: до и после передового торпедирования, до и после буровзрывных проходческих работ.

23.10.2019 на автоуклоне исследования были проведены методом ЕЭМИ

с применением прибора ANGEL-M с функцией АЭШ. В забое выработки, при различной ориентации антенны, по ее контуру фиксировались амплитуды ЕЭМИ и соответствующие им участки повышенных напряжений. По векторам максимальных значений параметров ЕЭМИ определялись ориентировки главных напряжений на различных участках. Области повышенных напряжений можно было определить как по длине выработки, так и по высоте.

На графиках (рисунки 3.22–3.24) представлены данные определения ориентировки повышенных напряжений по профилю автоуклона: непосредственно в забое и в зоне выброса (на расстояниях в 10 и 15 м от забоя). На рисунке 3.21 представлена выкопировка с плана ведения работ по автоуклону с указанием мест проведения замеров и нанесением векторов повышенных напряжений в результате исследований НДС массива прибором ANGEL-M и методом частичной скважинной разгрузки.

Согласно выполненным ориентировкам, в забое выделить максимальные амплитуды и повышенные напряжения не представилось возможным. Диаграмма распределения амплитуды ЕЭМИ по контуру достаточно равномерна, что, возможно, свидетельствует об отсутствии на данном участке, после выброса, повышенных напряжений.

По мере удаления от забоя по автоуклону ситуация с распределением амплитуд ЕЭМИ существенно менялась. Уже на расстоянии 10 м по контуру четко вырисовывается ориентация повышенных напряжений, при этом азимут составляет ориентировочно  $30^\circ$ . В 15 м диаграмма максимальных амплитуд становится еще более эллиптической, при этом вектор максимальных напряжений ориентирован по азимуту  $70^\circ$ . Следует отметить, что именно в этом месте, со стороны пониженных напряжений, была зафиксирована ниша выброса.

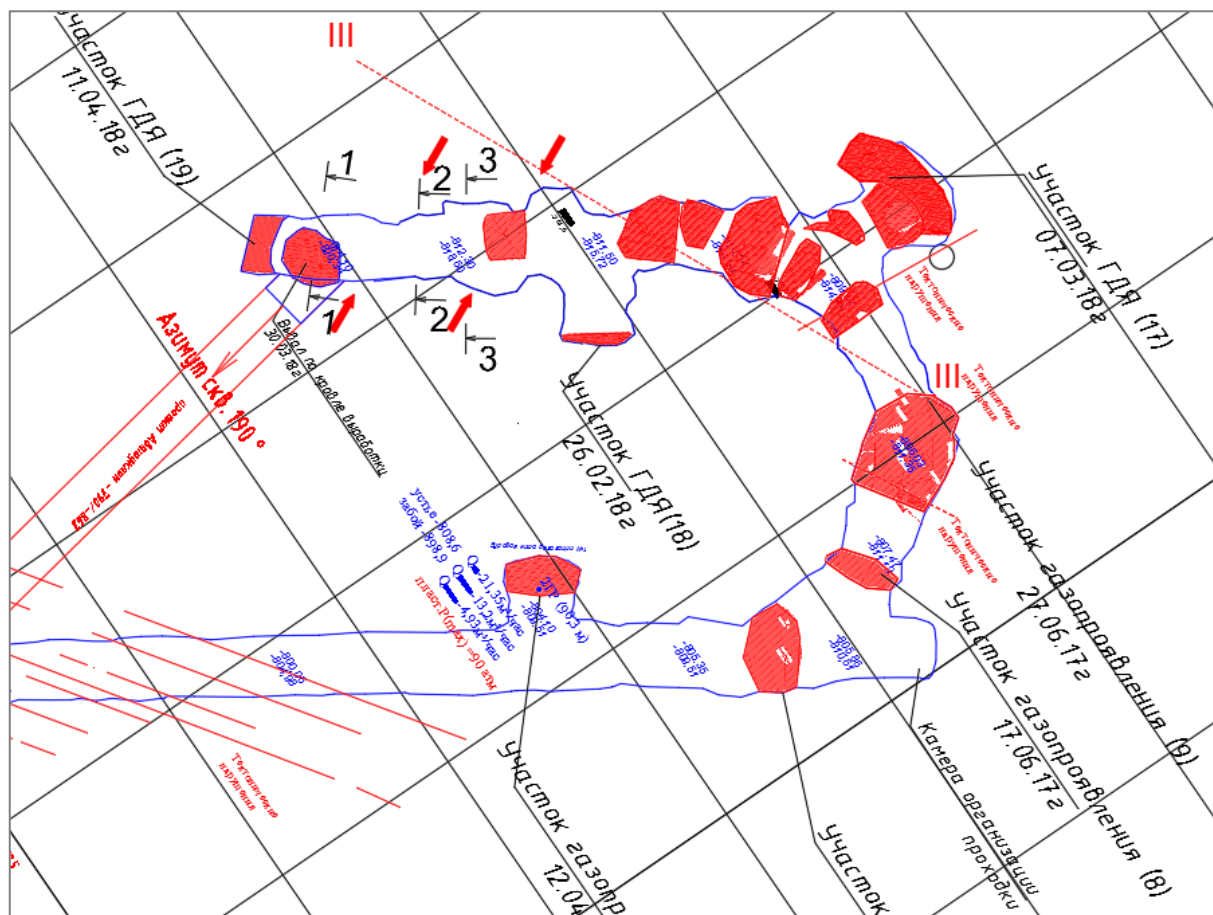


Рисунок 3.21 — План горных выработок по автоуклону с нанесением разрезов сечений и направлений повышенных напряжений

### Разрез 1-1

Распределение амплитуды импульсов в забое  
Автоуклона, зона выброса, 23.10.2019

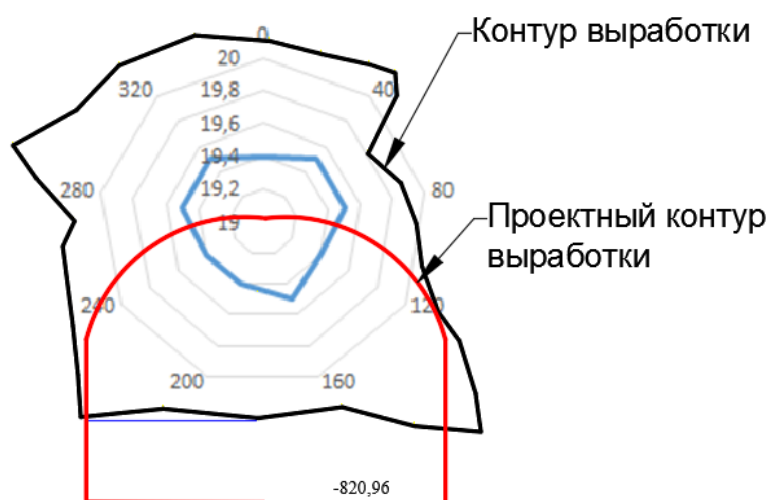


Рисунок 3.22 — Распределение амплитуды импульсов в забое автоуклона (сечение 1-1)

## Разрез 2-2

Распределение амплитуды импульсов в 10 м от зоны выброса, Автоуклон, 23.10.2019



Рисунок 3.23 — Распределение амплитуды импульсов в 10 м от забоя автоуклона (сечение 2-2), (красные стрелки показывают направление повышенных напряжений)

## Разрез 3-3

Распределение амплитуды импульсов в 15 м от зоны выброса, Автоуклон, 23.10.2019

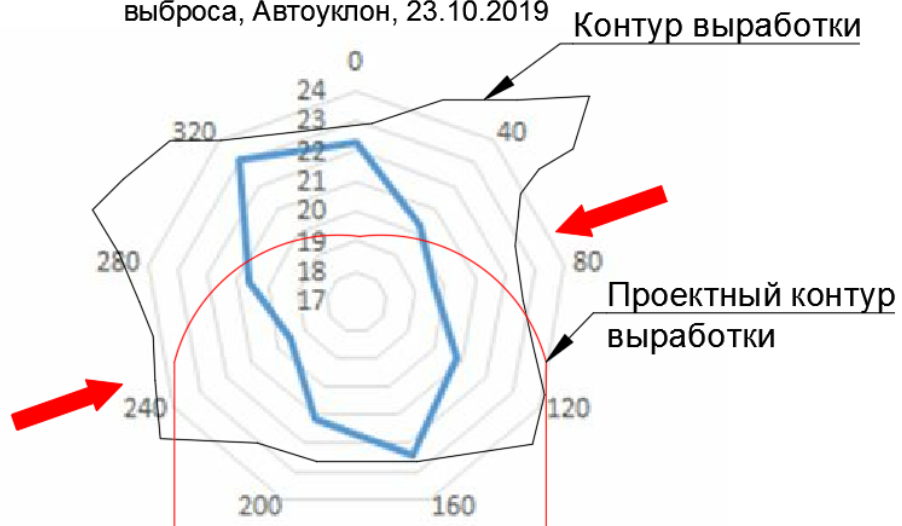


Рисунок 3.24 — Распределение амплитуды импульсов в 15 м от забоя автоуклона (сечение 3-3) (красные стрелки показывают направление повышенных напряжений)

На основании вышеприведенных измерений напряженного состояния массива, вмещающего автоуклон, выработки с наиболее интенсивными проявлениями ГДЯ, с помощью аппаратуры ANGEL-M установлено, что в массиве, окружающем горную выработку, действуют как горизонтальные, так и вертикальные напряжения. Данный вывод находит подтверждение в том факте, что при проявлениях ГДЯ в данной выработке происходило разрушение пород ее кровли, почвы (связано также с наличием выбросоопасных пластов в кровле и почве выработки), а также боков выработки. Однако в тупиковой части автоуклона массив находится в более уравновешенном состоянии, без какого-либо заметного преобладания направления напряжений. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что в данной части выработки было зафиксировано ГДЯ, то есть массив получил разгрузку и постепенно пришел в уравновешенное состояние.

Следует также отметить тот факт, что на разных участках проведения исследований прибором ANGEL-M в автоуклоне происходит некоторое изменение направления повышенных напряжений (рисунки 3.23 и 3.24 – красные стрелки), при этом на участке выработки в районе сечения 2-2 вертикальные напряжения превалируют над горизонтальными, а в районе сечения 3-3 горизонтальные напряжения превалируют над вертикальными. В ходе оценки НДС методом частичной скважинной разгрузки выявлено доминирование вертикальной составляющей тензора напряжений над горизонтальной. При этом ориентация вектора максимальных напряжений показала высокую сходимость с результатами измерений, зафиксированными прибором

ANGEL-M. Однако необходимо учесть, что временной интервал между описанными исследованиями в автоуклоне составляет 3 месяца (измерения прибором ANGEL-M проводились 23.10.2019, а скважинная разгрузка — 23.01.2020), и кроме того, изменилось направление проведения выработки. То есть направление повышенных напряжений в автоуклоне претерпевает довольно значительное изменение на относительно небольших участках

протяженности выработки. Данное обстоятельство можно объяснить влиянием на массив разрывных нарушения, в зоне действия которых происходит перераспределение направления воздействия на массив напряжений. В результате чего в зонах изменения направления действия главных напряжений при ведении горных работ (ведение взрывных работ) и происходят ГДЯ. Следует также предположить, что на плане горных выработок по автоуклону направления напряжений будут ориентированы перпендикулярно оси тектонического нарушения III-III (рисунок 3.21).

На этом же участке были проведены геофизические наблюдения по оценке напряженного состояния массива и выделение на основе дифференциации полей напряжений вблизи выработок аномальных зон. Наблюдения проводились аппаратурой ANGEL-M с функцией АЭШ по методу ВЭМИ.

Данный метод основан на принципе возбуждения и последующего приема возбужденного электромагнитного поля, и проводится с помощью незаземленных контуров – антенн возбуждения и приема, расположенных в выработке. Для практического применения, в условиях рудника «Интернациональный», был реализован метод бесконтактного электромагнитного зондирования, в режиме дипольного электромагнитного зондирования (ДЭМЗ), заключающемся в последовательном увеличении глубины проникновения электрических полей вглубь массива (от 1 до 15–17 м).

Сущность метода построена на зависимости электропроводности пород от величины горного давления (напряженного состояния массива) и трещиноватости. В свою очередь, удельная электропроводность горных пород определяет и интенсивность (амплитуду) электромагнитного поля, наведенного в горном массиве. Геомеханическое состояние массива при этом оценивается по величине параметра  $F$ .

Метод исследования НДС массива, в режиме ДЭМЗ, предполагает проведение однотипных манипуляций в каждой точке замерного профиля,



которые включают в себя регистрацию изменения величины излучаемого в массив сигнала в направлениях воздух-воздух, породный массив и почва-кровля, при разnose излучающей и регистрирующей антенн относительно друг друга (условного центра — точки или пункта зондирования) на расстояния 1, 2, 3 и так далее, до 15–17 м. То есть приемная и передающая антенны поочередно, синхронно устанавливаются в трех положениях — в плоскостях X, Y, Z.

При положении антенны вдоль оси выработки (перпендикулярно к плоскости X) регистрируется «эталонный» (фоновый) уровень излучения в данной измерительной точке и при конкретной величине разноса приемной и передающих антенн. Численное значение фонового уровня излучения используется в методике для получения безразмерных параметров регистрируемых сигналов из пласта и из кровли. При этом необходимо учитывать пространственное расстояние между антеннами и соответствующую среднюю электропроводимость горного массива. В каждом исследуемом профиле замерные точки рационально располагать по центру (оси выработки).

Результаты зондирования по методу ВЭМИ, проведенному по автоуклону, представлены на рисунках 3.25–3.26. Зондирование в вышеперечисленных выработках выполнялось поинтервально через 1 м, на глубину 12 м в массив. Пункты зондирования располагались друг от друга на расстоянии 10 м от забоя (вывала).

Согласно представленным гистограммам, геомеханическое состояние пород массива выработки вблизи боков не является однородным: в массиве, в его краевой части, до глубины 12 м характер распределения напряжений по величине соответствует трехслойной структуре. Вблизи боков выработки, на глубине от 1 м до 2 м, отмечаются зоны трещиноватости ( $F \geq 1,0$ ).

		борт	борт		
		правый	левый		
Глубина зондирования, м	12	1,17	1		
	11	1,17	1		
	10	1,17	1		
	9	0,86	0,86		
	8	0,64	0,64		
	7	1	0,39		
	6	0,31	0,34		
	5	0,32	0,3		
	4	0,54	0,51		
	3	0,93	0,91		
	2	1,87	1,83		
	1	0,67	0,66	Расстояние от	
	0	10	10	завала по автоуклону, м	
		*1	*1	Номер замера	

Рисунок 3.25 — Результаты наблюдений аппаратурой ANGEL–М с функцией АЭШ выработки (автоуклона) с оценкой напряженного состояния ее боков по значениям показателя напряженности F

		Кровля	Почва		
Глубина зондирования, м	12	1,4	1		
	11	1,17	1,17		
	10	1,17	1		
	9	1	1		
	8	1	1,17		
	7	0,58	1,17		
	6	1,43	1,43		
	5	2,09	2,09		
	4	2,32	2,18		
	3	2,51	2,73		
	2	3,54	3,7		
	1	0,91	0,96	Расстояние от	
	0	10	10	завала по автоуклону	
		*1	*1	Номер замера	

Рисунок 3.26 — Результаты наблюдений аппаратурой ANGEL–М с функцией АЭШ выработки (автоуклона), с оценкой напряженного состояния ее кровли и почвы, по значениям показателя напряженности F

Максимальная зона трещиноватости выделяется на глубине 2 м. За зоной трещиноватости начинается зона плотных пород (зона повышенных напряжений) ( $0,20 < F < 1,0$ ), граница которой доходит до 9 м. Далее зона повышенных напряжений переходит в зону напряжений, при которых состояние массива можно оценить как естественное невозмущенное. Таким образом, зона повышенных напряжений (максимум опорного давления) в горной выработке зафиксирована на глубине от 5 до 7 м.

Геомеханическое состояние кровли и почвы выработки, оцениваемое по величине параметра  $F$ , представлено на рисунке 3.26. Как видно из графика, состояние пород кровли и почвы отличается повышенной трещиноватостью. При этом максимальная зона трещиноватости распространяется на глубину зондирования до 5-6 м в кровлю и до 7-8 м в почву выработки. Далее фиксируется более плотная и относительно однородная структура массива. Данное обстоятельство также находит свое подтверждение и по результатам численного моделирования в окрестности автоуклона, где высота свода разгрузки составляет 8 м, при этом зона повышенной трещиноватости распространяется на глубину до 5 м в кровлю и до 6 м в почву выработки. При этом незначительная разница показаний в результате моделирования и исследований методом ВЭМИ объясняется тем, что расстояние между описанными точками проведения измерений по автоуклону составляет около 15 м, и кроме того, при создании модели учитывался тот факт, что выработка изменила свое направление и ее проведение производится по новой трассе.

В спиральном съезде блока № 11 исследования проводились также 23.10.2019. Замеры, методом ЕЭМИ, осуществлялись геофизическим прибором ANGEL-M непосредственно в забое спирального съезда. Замеры проводились по варианту зондирования — по профилю: в 5, 10 и 15 м от забоя.

Оценка напряженно-деформированного состояния горного массива выполнена по методам ЕЭМИ и ВЭМИ. На графике (рисунок 3.27) представлены результаты геофизических наблюдений краевых участков боков, кровли и почвы выработки. Как видно из графиков, состояние пород

боков, кровли и почвы выработки по профилю отличается значительной неоднородностью. Непосредственно у забоя спирального съезда, на расстоянии 3 м от него, фиксируется зона повышенной трещиноватости (зона значительной разгруженности). Далее, в глубину массива трещиноватость сменяется более плотной структурой. Однако выделить зону максимальных нагрузок на этом пункте зондирования не представилось возможным. Совершенно иная ситуация по распределению зоны максимальных напряжений была зафиксирована в пунктах зондирования на участках в 10 и 15 м от забоя спирального съезда. На данных участках зона разгрузки ограничивалась глубиной 1-2 м. Далее в массиве, с глубины 2 м, фиксировалась зона повышенных напряжений, которая распространялась в массив на глубину до 6-7 м. С 8 м, на данных участках, отмечена зона ненарушенного естественного состояния массива.

Подобная ситуация наблюдалась и при анализе геомеханического состояния пород кровли и почвы. В 3 м от забоя выработки зона трещиноватости отмечалась практически на всю глубину зондирования, что составляет порядка 12 м в кровлю и почву выработки. Данное значение также подтверждается результатами численного моделирования в окрестности спирального съезда ЭБ № 11, где высота свода разгрузки превышает 10 м, при этом зона повышенной трещиноватости распространяется на глубину до 4 м в кровлю и до 6 м в почву выработки. Незначительную разницу в показаниях в результате моделирования и исследований методом ВЭМИ можно объяснить тем, что расстояние между описанными точками проведения измерений по спиральному съезду ЭБ № 11 составляет около 13 м, и, кроме того, при создании модели учитывался тот факт, что выработка изменила свое направление с момента проведения измерений прибором ANGEL-M (рисунок 3.28).

Спиральный съезд блока №11 замеры от 23.10.19									
Глубина зондирования, м	борт правый			борт левый					
	13								
	12			0,85				1,1	
	11			0,82				0,95	
	10	1		3,29	1			0,64	
	9	1		1,26	1,14			0,61	
	8	0,89		0,48	1			0,55	
	7	0,65		0,52	0,65			0,57	
	6	0,35		0,49	0,36			0,53	
	5	0,26	0,58	0,56	0,26	0,65		0,59	
	4	0,18	0,45	0,68	0,18	0,47		0,68	
	3	0,07	0,27	0,82	0,07	0,3		0,81	
	2	0,31	0,23	1,2	0,3	0,24		1,17	
	1	0,94	1,05	1,41	0,81	1,11		1,51	
0	15	10	3	15	10	3	Расстояние от забоя Спирального съезда блок №11		
	*1	*2	*3	*1	*2	*3	Номер замера		

В 10 м от забоя, в массиве пород кровли и почвы на глубине 2-3 м, отмечены плотные структуры. В пункте зондирования, удаленного от забоя выработки на 15 м, выделено плотное «ядро», которое расположено в массиве на глубине до 5 м.

План горных выработок, по спиральному съезду ЭБ №11, с указанием мест проведения замеров прибором ANGEL-M (сечения 1-1 и 2-2) представлен на рисунке 3.28.

Методом ЕЭМИ в спиральном съезде были выполнены работы и по определению ориентированности главных напряжений. Результаты данных измерения представлены на диаграммах (рисунки 3.29–3.30). В результате измерений, выполненных по методу ЕЭМИ, получено, что главные напряжения на плоскости забоя ориентированы с азимутом  $210^\circ$  (преобладание горизонтального напряжения), а их максимальная амплитуда повысилась от 19,4 мкВ до 20,0 мкВ. В данном случае массив находится в нагруженном состоянии в связи с недавним продвижением выработки по уходу, в результате чего массив и получил дополнительную нагрузку.

На этом же участке был опробован метод сейсмоакустического контроля НДС горного массива. Замеры проводились в бок выработки, с расположением точки замера в 4 м от забоя. Для возникновения сейсмоакустических импульсов применялась вызванная акустическая эмиссия. Результаты данного эксперимента представлены в таблице 3.14.

Необходимо отметить, что геофизические наблюдения в спиральном съезде блока № 11 были проведены до выполнения процесса передового торпедирования.

## Разрез 1-1

Распределение амплитуды импульсов в забое  
спирального съезда блока №11 до торпедирования,  
23.10.2019

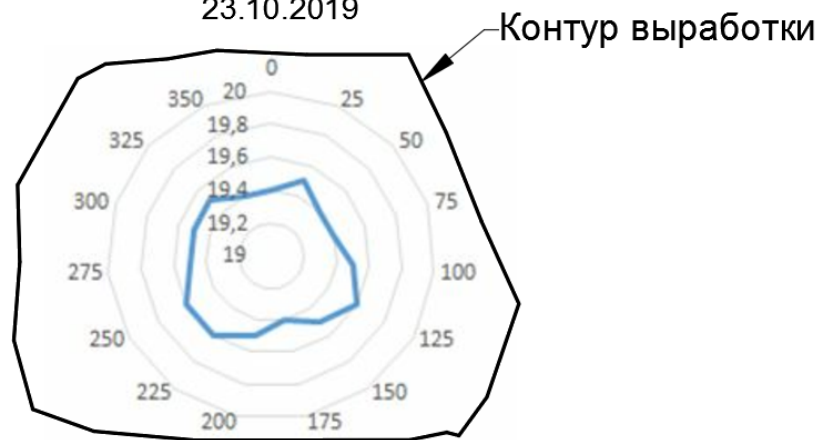


Рисунок 3.29 — Амплитудная диаграмма направленности ЕЭМИ в забое спирального съезда блока № 11 по его контуру до проведения передового торпедирования (сечение I–I)

Распределение амплитуды импульсов в забое  
спирального съезда ЭБ №11 23.10.19 по плоскости

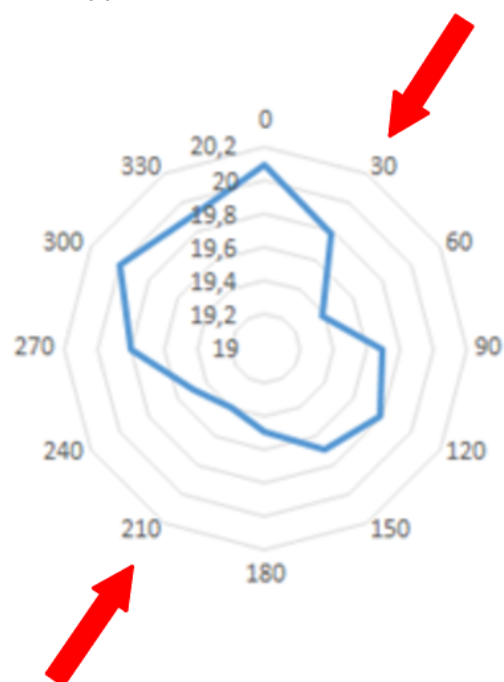


Рисунок 3.30 — Амплитудная диаграмма направленности ЕЭМИ в забое спирального съезда блока № 11 по его плоскости до проведения передового торпедирования (красные стрелки показывают направление повышенных напряжений)

Таблица 3.14 — Оценка НДС массива по сейсмоакустическому методу, выполненная 23.10.2019, до передового торпедирования

Режим замера	L	P	C	Дата	Время	t, с	A, мкВ	L1, мкВ	L10, мкВ	Alert	B
Тишина	4	1	1	23.10.2019	9:57	10	3,4	4,2	15,7	0	0,153
Тишина	4	1	2	23.10.2019	9:57	10	3,3	4,2	15,5	0	0,153
Тишина	4	1	3	23.10.2019	9:57	10	3,4	4,2	16,5	0	0,148
Тишина	4	1	4	23.10.2019	9:57	10	3,4	4,2	16,3	0	0,15
Тишина	4	1	5	23.10.2019	9:58	10	3,3	4,1	15,9	0	0,149
Удар в борт на 4 метра	4	2	1	23.10.2019	9:58	10	6,7	4,2	252,5	1	0,031
Удар в борт на 4 метра	4	2	2	23.10.2019	9:58	10	6,6	4,2	219,3	1	0,035
Удар в борт на 4 метра	4	2	3	23.10.2019	9:59	10	8	4,1	301,2	1	0,025
Удар в борт на 4 метра	4	2	4	23.10.2019	9:59	10	6,8	4,1	361,5	1	0,025

24.10.2019, в ночную смену, в забое спирального съезда было проведено передовое торпедирование. В утреннюю смену на этом участке были проведены повторные геофизические измерения.

Согласно результатам наблюдений, выполненных 24.10.2019 в забое спирального съезда блока № 11, характер распределения амплитуды ЕЭМИ и численные значения замеров после проведения передового торпедирования изменились по сравнению с результатами замеров, проведенных 23.10.2019. Причем это изменение отразилось как на диаграмме ориентировки максимальных напряжений, так и в их численных показателях. В результате измерений, выполненных по методу ЕЭМИ, получено, что главные напряжения ориентированы с азимутом 220°, а их максимальная амплитуда повысилась от 19,4 мкВ до 21,0 мкВ (рисунки 3.31–3.32). При этом направление напряжений в массиве претерпело незначительные изменения по



сравнению с наблюдениями в выработке до проведения передового торпедирования, также появилось незначительное увеличение амплитуды импульсов. Можно предполагать, что после передового торпедирования массив подвергся дополнительной пригрузке, при этом максимальные напряжения были отмечены по правому внутреннему боку спирального заезда.

Данное предположение, о пригрузке боков массива, подтверждается и результатами измерений, выполненных другими методами. Так, например, по методу ВЭМИ (рисунок 3.33) пригрузка массива зафиксирована на контрольной точке 10 м, по глубине (до передового торпедирования эта точка отмечена как пункт зондирования, на глубине 15 м). Важно отметить, что максимум опорного напряжения сместился в глубину массива, практически на 1 м (с 3 м до 4 м), но при этом зона повышенных напряжений стала существенно шире. Возможно, в результате передового торпедирования произошло смещение опорного давления в глубину массива, тем самым обеспечив безопасное расстояние защитной зоны.

*Данные, полученные по сейсмоакустическому методу*

В таблице 3.15 приведены результаты по оценке НДС массива по импульсам, вызванными акустической эмиссией в бок выработки, после передового торпедирования. Согласно представленным значениям, амплитуда сейсмоакустических импульсов, идущих из массива в момент удара в 2,7 раза, превышали значения, полученные по данному методу, до проведения передового торпедирования (таблица 3.14).

## Разрез 1-1

Распределение амплитуды импульсов в забое спирального съезда блока №11 после торпедирования,  
24.10.2019

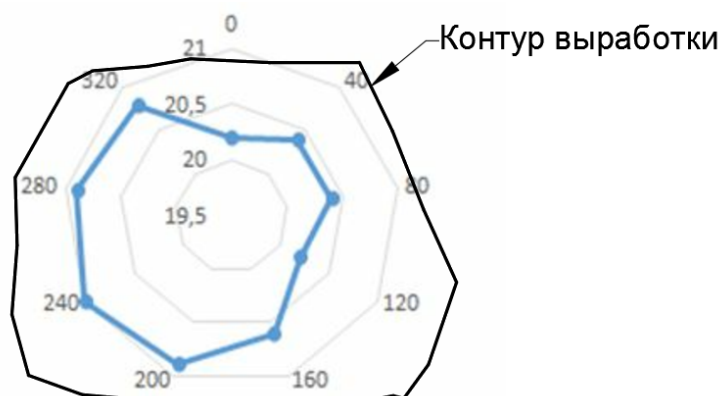


Рисунок 3.31 — Амплитудная диаграмма направленности ЕЭМИ в забое спирального съезда блока № 11, по контуру выработки, после проведения передового торпедирования (сечение I-I)

Распределение амплитуды импульсов в забое спирального съезда ЭБ №11 24.10.19 по плоскости после торпедирования

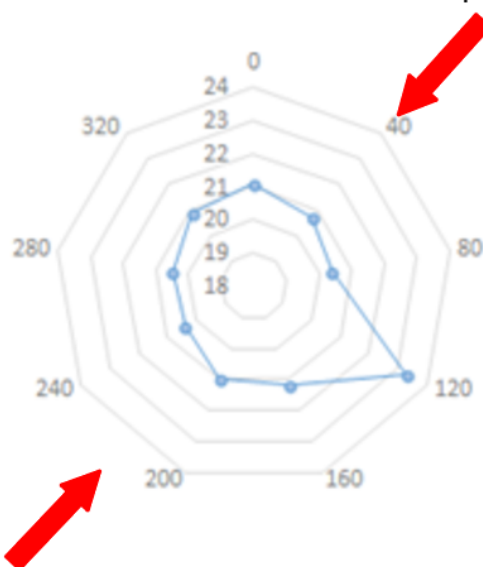


Рисунок 3.32 — Амплитудная диаграмма направленности ЕЭМИ в забое спирального съезда блока № 11, по плоскости выработки, после проведения передового торпедирования

		Борт правый	Борт левый	Кровля	Почва		
Глубина зондирования, м	10	0,33	0,39	0,4	0,44		
	9	0,75	0,6	0,4	0,46		
	8	0,54	0,44	0,33	0,44		
	7	0,35	0,33	0,32	0,36		
	6	0,21	0,2	0,45	0,5		
	5	0,18	0,17	0,57	0,7		
	4	0,12	0,12	0,49	0,47		
	3	0,17	0,17	0,45	0,55		
	2	0,31	0,3	0,55	0,65		
	1	0,85	0,89	1,01	1,17	Расстояние от	
	0	10м	10м	10м	10м	забоя СС	
		*1	*1	*1	*1	Номер замера	

Рисунок 3.33 — Результаты наблюдений аппаратурой ANGEL-M с функцией АЭШ спирального съезда блока № 11 с оценкой напряженного состояния бортов, кровли и почвы выработки, по значениям показателя напряженности F, после передового торпедирования

Таблица 3.15 — Оценка НДС массива по сейсмоакустическому методу, выполненному 24.10.2019, после передового торпедирования

Режим замера	L	P	C	Дата	Время	t, с	A, мкВ	L1, мкВ	L10, мкВ	Alert	B
тишина	16	2	2	24.10.2019	9:49	10	4,3	5,1	35,3	0	0,124
тишина	16	2	3	24.10.2019	9:49	10	3,6	5	18	0	0,16
тишина	16	2	4	24.10.2019	9:50	10	3,7	5,1	19,3	0	0,157
тишина	16	2	5	24.10.2019	9:50	10	4	4,8	38,1	0	0,117
тишина	16	2	6	24.10.2019	9:50	10	3,5	4,9	17,4	0	0,161
удар 4 метра от датчика	16	2	7	24.10.2019	9:50	10	16,1	4,8	930,8	1	0,011
удар 4 метра от датчика	16	2	8	24.10.2019	9:51	10	11,7	4,8	930,8	1	0,012

удар 4 метра от датчика	16	2	9	24.10.2019	9:51	10	16,4	4,8	930,8	1	0,011
-------------------------------	----	---	---	------------	------	----	------	-----	-------	---	-------

Однако более сильное воздействие испытали краевые части горной выработки по спиральному съезду после БВР. По результатам проведенных 25.10.2019 исследований массива методами ЕЭМИ и ВЭМИ, в качестве примера, приведены данные определения ориентировки главных напряжений на диаграммах (рисунки 3.34–3.35). Согласно анализу данных, полученных методом регистрации параметров ЕЭМИ, значения амплитуды естественного электромагнитного излучения выросли до 25 мкВ. При этом главные напряжения ориентированы по азимуту 125°. То есть вектор напряжения изменил свое направление почти на 90°, по сравнению с напряжением в массиве до проведения БВР, при этом существенное увеличение амплитуды импульсов указывает на значительное увеличение напряжений внизу левого бока выработки. На расстоянии от забоя более 15 м НДС массива существенных изменений не претерпело.

Изменения напряженного состояния массива, на краевых участках горной выработки после проведения БВР, зафиксированы и по методу ВЭМИ (рисунки 3.36–3.37). Изменения напряжений, в массиве окружающих выработку пород, отмечены в приближении максимума опорного давления к контуру выработки по бокам и появлении значительной трещиноватости в породах кровли и почвы. Отмеченные изменения могут существенно повлиять на безопасное состояние выработки при дальнейшем ведении горных работ.

Анализ рисунка 3.34 показывает, что до проведения торпедирования массив находился в более разгруженном состоянии, в связи с естественным снижением напряжений с течением времени.

## Разрез 1-1

Распределение амплитуды импульсов в забое спирального съезда блока №11 после БВР,  
25.10.2019



Рисунок 3.34 — Амплитудная диаграмма направленности ЕЭМИ в забое спирального съезда блока № 11 по контуру выработки после проведения БВР (красные стрелки показывают направление главных напряжений) (сечение 1-1)

## Разрез 2-2

Распределение амплитуды импульсов в 15 м от забоя спирального съезда блока №11 после БВР,  
25.10.2019

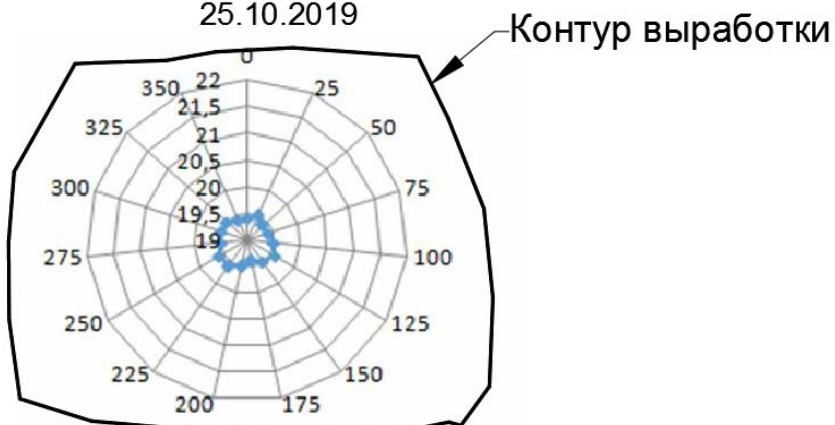


Рисунок 3.35 — Амплитудная диаграмма направленности ЕЭМИ в 15 метрах от забоя спирального съезда блока № 11, по контуру выработки, после проведения БВР (сечение 2-2)

			правый борт	левый борт	кровля	почва		
	Глубина зондирования, м	12						
		11	1	1	1,17	1,17		
		10	1,14	1,33	1,33	1,33		
		9	1,13	1,13	1,5	1,5		
		8	1	1	1,86	1,86		
		7	0,54	0,58	1,5	1,67		
		6	0,36	0,35	0,92	0,96		
		5	0,29	0,29	0,68	0,75		
		4	0,2	0,2	0,37	0,4		
		3	0,26	0,25	0,42	0,47		
		2	0,54	0,54	0,73	0,82	расстояние	
		1	1,05	1,03	1,13	1,33	от забоя СС блока №11	
	0	5м	5м	5м	5м			
		1*	1*	1*	1*			

Рисунок 3,36 — Результаты наблюдений аппаратурой ANGEL-M с функцией АЭШ спирального съезда блока № 11 с оценкой напряженного состояния бортов, кровли и почвы выработки по значениям показателя напряженности F после БВР (25.10.2019)

			левый борт	правый борт					
Глубина зондирования, м	12								
	11	1	1						
	10	1,14	1,33						
	9	1,13	1,13						
	8	1	1						
	7	0,54	0,58						
	6	0,36	0,35						
	5	0,29	0,29						
	4	0,2	0,2						
	3	0,26	0,25						
	2	0,54	0,54						
	1	1,05	1,03						
0	5	5							
	1*	1*							

			кровля	почва					
Глубина зондирования, м	12								
	11	1,17	1,17						
	10	1,33	1,33						
	9	1,5	1,5						
	8	1,86	1,86						
	7	1,5	1,67						
	6	0,92	0,96						
	5	0,68	0,75						
	4	0,37	0,4						
	3	0,42	0,47						
	2	0,73	0,82						
	1	1,13	1,33						
0	5	5							
	1*	1*							

Рисунок 3.37 — Состояние боков выработки, кровли и почвы после БВР, в 5 м от забоя спирального съезда блока № 11 (25.10.2019)

При проведении торпедирования незначительная перегрузка напряжений объясняется воздействием на массив сотрясательного взрывания, что немного ослабило прочность пород и сдвинуло напряжения ближе к обнаженной поверхности выработки. При проведении БВР по уходу выработки произошло резкое увеличение напряжений в массиве в результате их воздействия и выемки горной массы.

Смещение максимума опорного давления к контуру выработки может спровоцировать ГДЯ, а повышенная трещиноватость в массиве – привести к внезапному выбросу породы и газа.

На представленной гистограмме (рисунок 3.38) приведены сопоставительные графики НДС массива, в контуре выработки, по спиральному съезду блока № 11, после проведения передового торпедирования и БВР.

		Спиральный съезд блока №11 после передового торпедирования (24.10.2019)				Спиральный съезд блока №11 после БВР (25.10.2019)					
Глубина зондирования, м		Борт правый	Борт левый	Кровля	Почва	Борт правый	Борт левый	Кровля	Почва		
	11					1	1	1,17	1,17		
	10	0,33	0,39	0,4	0,44	1,14	1,33	1,33	1,33		
	9	0,75	0,6	0,4	0,46	1,13	1,13	1,5	1,5		
	8	0,54	0,44	0,33	0,44	1	1	1,86	1,86		
	7	0,35	0,33	0,32	0,36	0,54	0,58	1,5	1,67		
	6	0,21	0,2	0,45	0,5	0,36	0,35	0,92	0,96		
	5	0,18	0,17	0,57	0,7	0,29	0,29	0,68	0,75		
	4	0,12	0,12	0,49	0,47	0,2	0,2	0,37	0,4		
	3	0,17	0,17	0,45	0,55	0,26	0,25	0,42	0,47		
	2	0,31	0,3	0,55	0,65	0,54	0,54	0,73	0,82		
	1	0,85	0,89	1,01	1,17	1,05	1,03	1,13	1,33	Расстояние от	
	0	5м	5м	5м	5м	5м	5м	5м	5м	забоя СС	
		*1	*1	*1	*1	1*	1*	1*	1*	Номер замера	

Рисунок 3.38 — Результаты наблюдений аппаратурой ANGEL-M с функцией АЭШ по спиральному съезду блока № 11, со сравнительной оценкой напряженного состояния боков, кровли и почвы выработки по значениям показателя напряженности F после проведения передового торпедирования (24.10.2019) и после БВР (25.10.2019)

Таким образом, результаты геофизических исследований, проведенных в период с 23.10.2019 по 26.10.2019 в горных выработках рудника «Интернациональный» методами ЕЭМИ, ВЭМИ и сейсмоакустическому, позволили установить следующие характеристики геомеханического состояния породных массивов:

- в забое спирального съезда ЭБ № 11 вертикальные напряжения хоть и незначительно, но преобладают над горизонтальными, что приводит к увеличению напряженности в боках выработки, соответственно приводящей к отжиму пород по бокам;

- в местах проведения измерений по автоуклону нельзя определенно выделить направление напряжений: так, в 10 м от забоя преобладают вертикальные напряжения, а уже в 15 м — горизонтальные. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что выработка находится в зоне влияния геологических нарушений, которые и способствуют довольно резкой смене направления напряжений;

- применение вышеперечисленных методов по оценке напряженного состояния горного массива и краевых частей горных выработок позволяет бесконтактным способом определить структурные особенности горных пород на значительную глубину (до 15 м);

- за счет выявления зон повышенных напряжений данными методами, можно оценить расстояние до максимума опорного давления;

- при применении способа передового торпедирования зона максимума опорного давления смещается в глубину массива, в связи с чем данное обстоятельство можно использовать как благоприятный для безопасного ведения горных работ фактор;

- при производстве БВР существенным образом меняется как структура горных пород, на краевых участках выработок, так и характер перераспределения опорного давления в массиве. По бокам относительно забоя на расстояние до 10 м происходит пригрузка боков выработки. По кровле, почве и забою выработки буровзрывные работы приводят к



появлению повышенной трещиноватости и, соответственно, активизации фильтрационных свойств вмещающих пород. Данные факторы могут негативно отразиться на безопасности работ при проведении вспомогательных выработок [50];

–проведение спирального съезда ЭБ № 11 осуществляется в более благоприятных условиях по сравнению с автоуклоном, что связано с неизменным направлением повышенных напряжений по трассе проведения выработки и позволяет сделать более благоприятный прогноз о возможности возникновения ГДЯ в данной выработке [50].

Исходя из результатов исследований и опыта работ АО «ВНИМИ» электромагнитными методами можно заключить, что характер изменения параметров ЕЭМИ и ВЭМИ в горных породах, при оценке зон опорного давления и степени нарушенности массива, наиболее близок к реальному. Установлено, что электрометрические методы ЕЭМИ и ВЭМИ эффективны и при поиске аномальных участков в горных выработках по методике дипольного электропрофилирования.

Если в массиве нет участков, тел и зон, различающихся по проводимости, то магнитное поле излучающего диполя в выработке находится на уровне, отвечающем уровню нормального (повышенного) поля напряжений. Для слоистой среды, имеющей, в том числе, структурную неоднородность, поле напряжений может существенно отличаться от нормального поля, что, в свою очередь, может быть зафиксировано методом ВЭМИ.

Параметры развития зон трещиноватости, полученные в результате численного моделирования, подтверждаются исследованиями, проведенными прибором ANGEL-M с функцией АЭШ. Исследования напряженно-деформированного состояния массива методом частичной скважинной разгрузки зафиксировали изменения в направлениях главных напряжений в массиве, обусловленные наличием влияния на массив геологических разрывных нарушений. В связи с этим исследование НДС массива

распространяется на локальный участок, ограниченный зонами дизъюнктивных нарушений.

При ведении горных работ следует улучшить качество геологического прогноза для отслеживания зон влияния геологических нарушений, где происходит снижение крепости пород.

### **3.6 Уточнение границ зоны влияния геологических нарушений в окрестностях автоуклона**

Как было отмечено выше, в границах зон влияния геологических нарушений значительно осложняется ведение очистных и подготовительных работ, а также довольно сильно увеличивается вероятность возникновения аварийных ситуаций вследствие того, что в этих местах происходит значительное снижение крепости горных пород, увеличивается обводненность выработок, значительно изменяется структурный и литологический состав окружающего массива, а кроме того, значительно увеличивается возможность возникновения ГДЯ при проведении выработки в результате значительного изменения направления напряжений в массиве, в данных зонах.

Поэтому для снижения влияния перечисленных негативных факторов и возможности предотвращения возникновения аварийных ситуаций следует провести работы по уточнению границ зон влияния данных геологических нарушений.

В большинстве случаев разрывные нарушения представлены разрывом-сместителем, зоной дробления и зоной повышенной трещиноватости. В ненарушенной области залегания горных пород частота трещин обычно составляет небольшую естественную величину (5–10 трещин на 1 м), а крепость породного массива относительно высокая. С приближением к разрыву число трещин неуклонно растет, и на участке вблизи поверхности сместителя количество трещин практически трудно учесть. Породы на этом

участке часто перемяты, бесструктурны, крепость их понижена в 2-3 раза. Зона у разрыва с интенсивной трещиноватостью и низкой крепостью массива названа зоной влияния разрыва. Она включает в себя зону с пониженной крепостью в висячем крыле разрыва и зону в лежащем крыле.

Опасные зоны у тектонических нарушений многообразны, причем для некоторых нарушений эти зоны могут быть комплексными, то есть участок тектонического нарушения может быть опасным по нескольким факторам (удароопасности и выбросоопасности пород и т. д.). Но это все же одна и та же опасная зона, только величина ее должна быть принята максимальной, исходя из нескольких имеющих место осложняющих факторов.

Так как все проявления ГДЯ зафиксированы в автоуклоне, предлагается провести расчеты ширины опасной зоны по методике, описанной в нормативном документе [220]. Согласно указанным рекомендациям, ширина участка с пониженной крепостью пород ( $B$ ), с каждой стороны от сместителя, определяется по формуле:

$$B = \frac{N}{\sin \beta}, \quad (3.1)$$

где  $N$  – нормальная (стратиграфическая) амплитуда смещения, м;

$\beta$  – двугранный угол между плоскостью напластования пород и плоскостью сместителя, град.

При этом зона влияния геологических нарушений имеет размеры по 20 м в обе стороны от границ геологического нарушения. Окончательно зона влияния геологического нарушения имеет следующий вид:

$$B_{\text{вл}} = 20 + B = 20 + \frac{N}{\sin \beta}. \quad (3.2)$$

Согласно представленным данным, по автоуклону в местах наибольшей концентрации проявлений ГДЯ располагается четыре геологических нарушения (наименование которых принято условно: I–I, II–II, III–III и IV–IV). Геологические разрезы по трассе проведения автоуклона с нанесенными геологическими нарушениями представлены на рисунках 3.39–3.41. План горных выработок по

автоуклоны с нанесением геологических нарушений, а также зон их влияния, полученных в результате произведенных расчетов, представлен на рисунке 3.42.

Следует отметить, что по представленным данным отследить амплитуду нарушения III–III не представляется возможным, скорее всего, нарушение представлено перегибом пород.

Результаты расчета зон влияния геологических нарушений по трассе проведения автоуклона в районе наибольшей концентрации проявлений ГДЯ представлены в таблице 3.16.

Таблица 36 – Результаты расчета зон влияния геологических нарушений по трассе проведения автоуклона

Наименование нарушения	Амплитуда нарушения, м (N)	Двухгранный угол между плоскостью напластования пород и плоскостью сместителя, град. ( $\beta$ )	Зона влияния нарушения в каждую сторону от самого нарушения, м
I–I	0,2	85	20,2
II–II	0,6	88	20,6
III–III	–	83	20
IV–IV	14	37	43,2

Анализ таблицы 3.16 позволяет установить, что зона влияния нарушений составляет не менее 20 м в каждую сторону от самого нарушения.

Анализ рисунка 3.42 показывает, что все проявления ГДЯ в автоуклоне приурочены к зоне влияния геологических нарушений, а наибольшая их концентрация располагается на участках наложения зон влияния геологических нарушений. Таким образом, в зонах влияния геологических нарушений, где происходит снижение крепости пород, а также смена направлений напряжений в массиве, наиболее велика вероятность возникновения ГДЯ. Данное обстоятельство обязательно должно учитываться при ведении горных работ, и при подходе выработки к зонам влияния нарушений необходимо проводить прогноз ГДЯ.

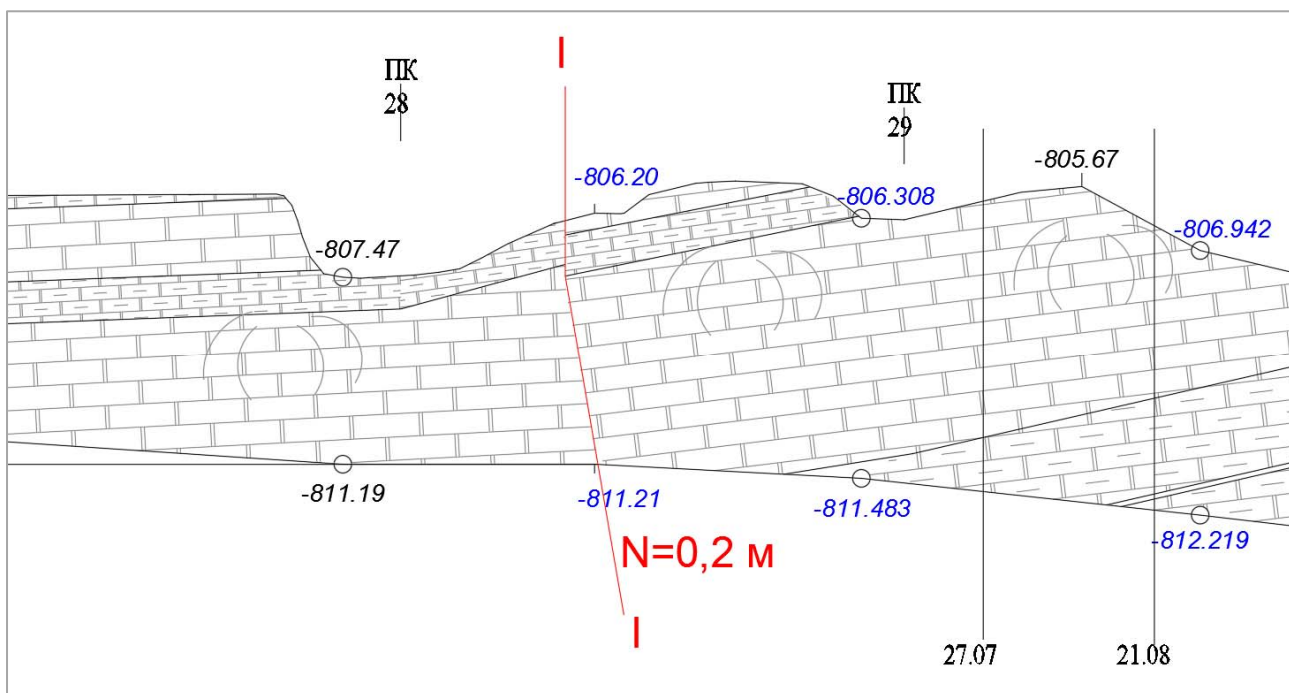


Рисунок 3.39 — Геологический разрез по трассе проведения автоуклона в районе условно названного нарушения I-I

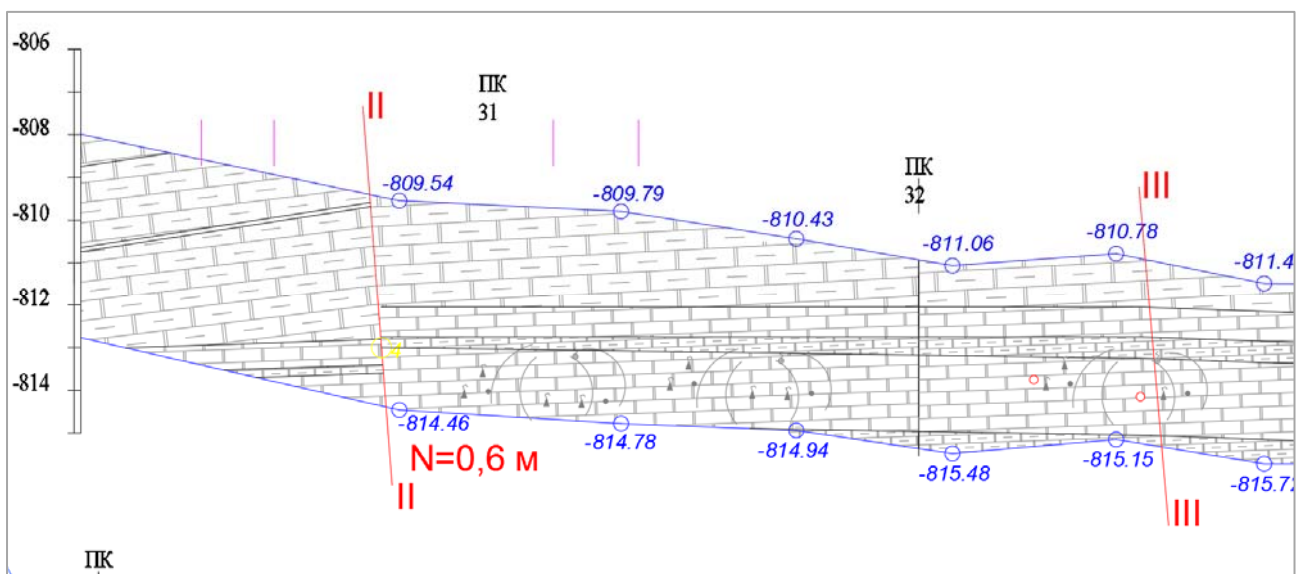


Рисунок 3.40 — Геологический разрез по трассе проведения автоуклона в районе условно названных нарушений II-II и III-III

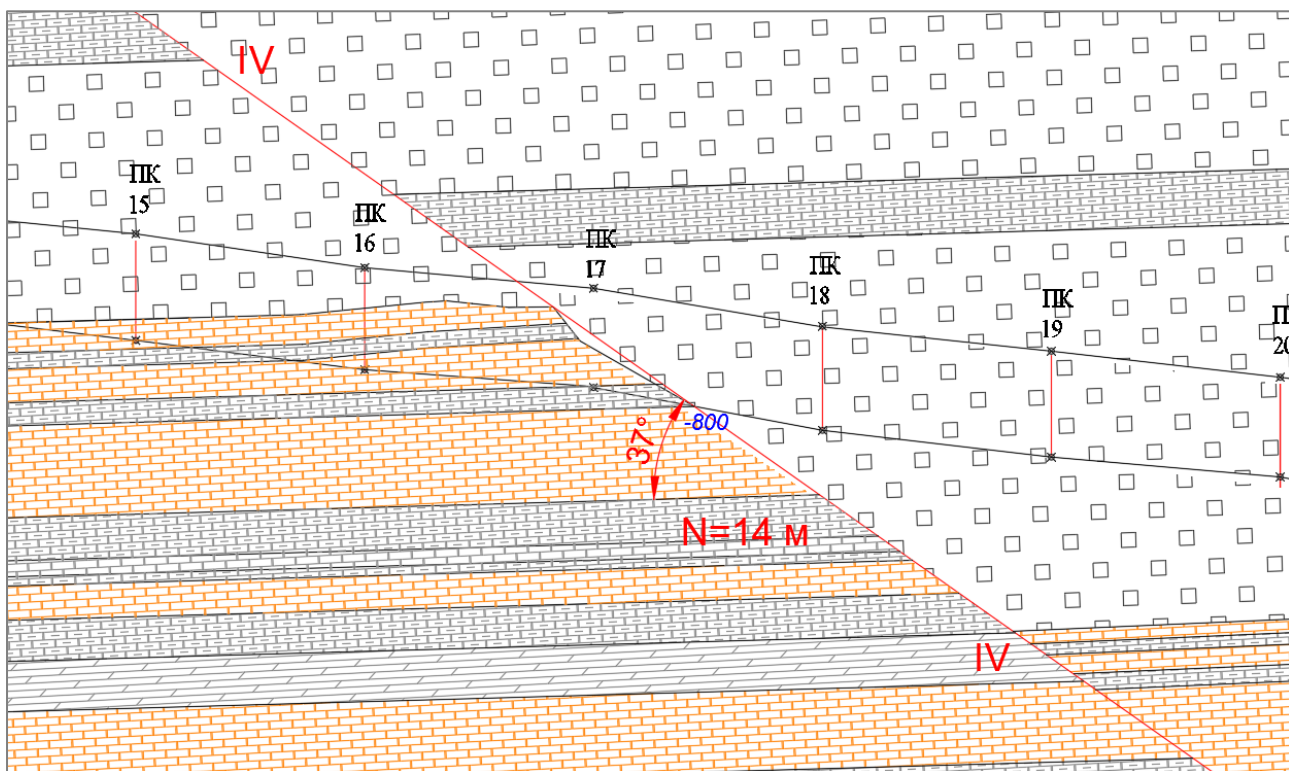


Рисунок 3.41 — Геологический разрез по трассе проведения автоуклона в районе условно названного нарушения IV–IV

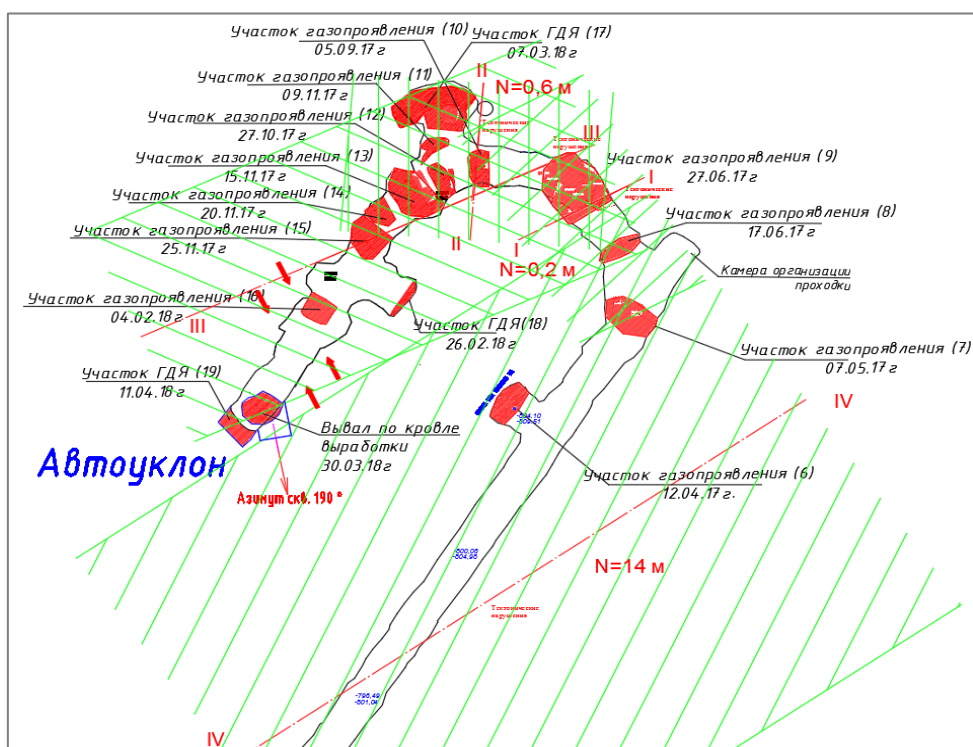


Рисунок 3.42 — План горных выработок по автоуклону с нанесением геологических нарушений и зоны их влияния (зоны влияния нарушений выделены зеленой штриховкой)

### 3.7 Измерение смещений и расслоений пород кровли спирального съезда

Инструментальные измерения смещений и расслоений пород кровли спирального съезда ЭБ № 11 проводились на реперной станции, установленной в 1 м от забоя выработки и состоящей из трех тросов длиной 4,8–6,3 м, 3,3 м и 1,8 м, закрепленных в скважине длиной 4,5–6 м с помощью специального удерживающего устройства, соответственно, на расстоянии 4,5–6 м, 3 м и 1,5 м от устья скважины в кровле выработки, при этом в устье скважины монтируется устьевая трубка. В 10 см от конца устьевой трубки, на каждом тросе, устанавливаются метки: три метки на тросе длиной 4,8–6,3 м, две метки на тросе длиной 3,3 м и одна метка на тросе длиной 1,8 м, ниже которых остается свободный конец троса длиной 20–15 см.

Схема установки реперной станции представлена на рисунке 3.43.

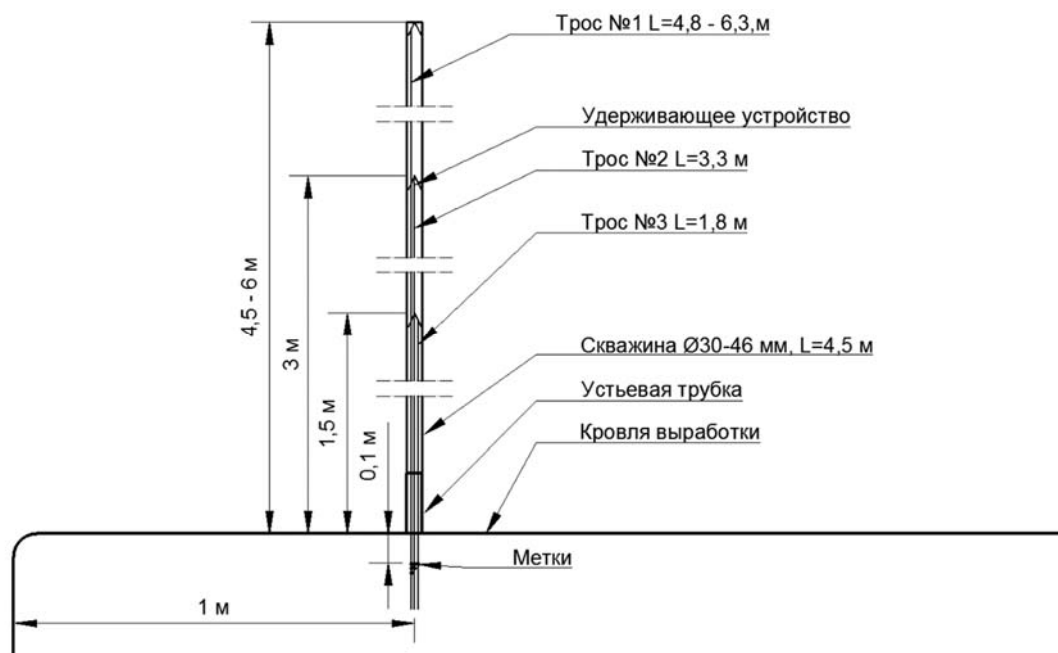


Рисунок 3.43 — Схема установки реперной станции  
в спиральном съезде ЭБ № 11

Реперная станция была установлена 26.10.2019 в 1 м от забоя спирального съезда ЭБ № 11. Первое снятие показателей с реперной станции было произведено 27.11.2019, на этот момент подвигание забоя выработки составило 1,7 м от положения забоя выработки на момент установки реперной станции. Второе снятие показателей было осуществлено 21.01.2020. Полученные смещения пород кровли, на момент снятия показателей, представлены в таблице 3.17.

Таблица 3.17 — Смещения по реперной станции, установленной в спиральном съезде ЭБ № 11

№ репера	Глубина заложения, м	Смещения на 27.11.2019, мм	Смещения на 21.01.2020, мм	Примечание
1	4,5	-9,8	20	Трос оторван (возможно, был растянут)
2	3,0	-3,4	-79,7	—
3	1,5	-1,3	-3,0	—

График динамики смещений, зафиксированных в спиральном съезде ЭБ № 11, представлен на рисунке 3.44. Общие зафиксированные смещения представлены на рисунке 3.45.

На дату 21.01.2020 смещения по реперу, заложенному на глубину 4,5 м, зафиксировать не удалось, по причине обрыва троса. Таким образом, максимальные смещения зафиксированы по реперу с глубиной заложения 3 м в кровлю выработки, составляющие 79,7 мм по истечении 87 суток с момента его установки. За этот период времени было совершено семь циклов БВР по уходу выработки, в результате чего забой спирального съезда ЭБ № 11 отделился от установленной реперной станции на 13 м (уход забоя составил 12 м + 1 м — первоначальное отставание реперной станции от забоя выработки).



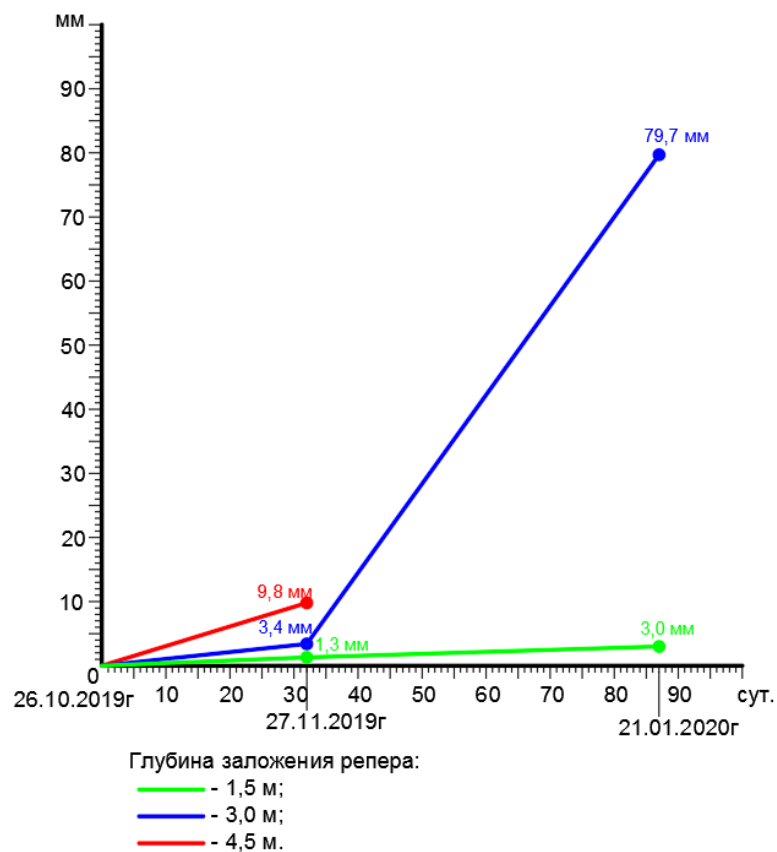


Рисунок 3.44 — Динамика смещений пород кровли в спиральном съезде  
ЭБ № 11

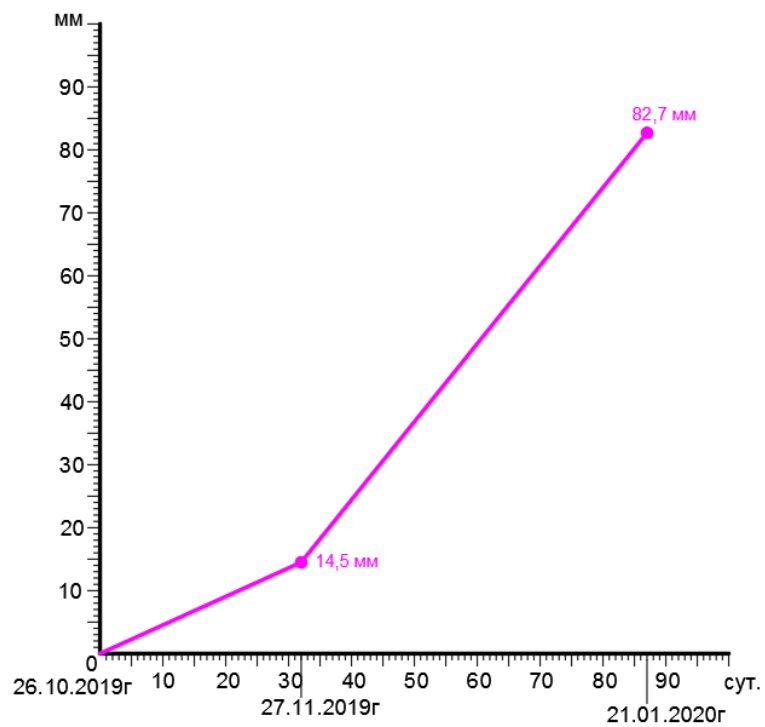


Рисунок 3.45 — Общие смещения пород кровли в спиральном съезде ЭБ № 11 в период с  
26.10.2019 по 21.01.2020

Анализируя данную гистограмму смещений, можно сделать вывод, что основное смещение пород кровли произошло в результате отслоения слоя бежевого доломита (пласта 4), находящегося в кровле выработки, от вышележащего слоя серого доломита.

Дополнительно на смещения также повлияла трещиноватость массива, вмещающего горную выработку. При проведении исследований в районе установки реперной станции в призабойном пространстве спирального съезда ЭБ № 11 прибором ANGEL-M установлено, что зона трещиноватости распространяется в кровлю выработки на глубину порядка 12 м. То есть отслоения пород кровли возможны на довольно внушительную глубину.

Однако точно определить смещения и их характер в рассматриваемой выработке в настоящее время довольно затруднительно, по причине довольно длительных промежутков времени между фиксациями показаний смещений по установленной реперной станции и, соответственно, отсутствием данных по смещениям непосредственно после ведения взрывных работ. Кроме того, тросик наиболее верхнего уровня реперной станции (репер № 1) на момент вторичного снятия показаний оказался растянут, что отрицательно повлияло на возможность отследить динамику смещений в более глубоких слоях пород кровли выработки.

Таким образом, для достоверного определения смещений в кровле спирального съезда ЭБ № 11 необходимы дальнейшие исследования.

К вышеперечисленным основным выводам по установленным закономерностям геомеханического состояния породных массивов, на различных участках подготовки и отработки рудных тел, на основе результатов выполненных геофизических исследований можно добавить следующее:

– пороговые значения прогностических параметров (критериев) геофизического электромагнитного метода прогноза удароопасности участков горных массивов можно установить путем измерения и регистрации параметров ЕЭМИ программно-аппаратным комплексом ANGEL-M;

– внезапный выброс породы и газа, являющийся причиной загазирования выработок, в большей степени может инициироваться буровзрывными работами проходческого забоя. Следствием данного газодинамического процесса является не только загазирование выработки, но и наличие дополнительного объема отбитой горной массы;

– вышеупомянутые газодинамические явления связаны с приуроченностью их к прослоям тонкозернистых, песчанистых, бежевых, газонасыщенных доломитов. Это позволяет заключить, что причиной дополнительного разрушения породы, образования полости и загазирования выработок являются текстурно-структурные особенности пород массива, отличающиеся тонкоплитчатой интенсивной трещиноватостью. Кроме того, возникновение ГДЯ приурочено к зонам влияния геологических нарушений, где происходит довольно резкая смена направлений напряжений в массиве, влекущая за собой изменение упругих свойств массива;

– для более полной оценки геомеханического состояния вмещающих пород горных выработок требуется установление параметров геотектонических напряжений в горном массиве, то есть определение направлений и величин главных напряжений (горизонтальных, вертикальных). Параметры главных напряжений являются необходимым начальным условием для численного моделирования и оценки геомеханического состояния вмещающих пород горных выработок, которые, в свою очередь, необходимы при обосновании параметров их крепления.

### **3.8 Выводы по главе 3**

1. 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 низкую газопроницаемость, не превышающую  $2,11 \text{ мД}$ , появление этих пород в

контуре проводимой выработки является прогностическим признаком зон, опасных по ГДЯ в виде выбросов пород и газа.

2. Гипотеза о том, что выбросы из почвы выработок превышают по масштабам иные локализации, не имеет достаточной статистической значимости. Однако существенные различия подтверждаются при анализе дисперсии объемов перемещенной породы, что указывает на высокую неоднородность масштабов инцидентов именно в почве выработки. Такое перекрестное подобие (или отличие) трех распределений указывает на три характерные ситуации формирования выброса: значительный-незначительный объем ослабленной породы и значительный-незначительный объем выделившегося газа. Комбинация «незначительный объем породы и незначительный объем газа», очевидно, не рассматривается как происшествие и не попадает в статистику.

3. Оценки параметров напряжений в массиве горных пород рудника «Интернациональный» на глубинах отнесения к опасным по внезапным выбросам пород и газа методами частичной скважинной разгрузки и геофизическими показали противоречивые результаты. На различных участках выработок в районе произошедших выбросов наблюдалось как полностью разгруженное состояние, так и гравитационное, и тектоническое поле напряжений. Резкая смена направлений и параметров напряжений в массиве является одним из свидетельств того, что внезапные выбросы приурочены к зонам влияния тектонических нарушений.

4. Построение опасных зон у геологических нарушений по динамическим явлениям в соответствии с нормами для угольных месторождений показало, что все внезапные выбросы произошли в зонах влияния геологических нарушений, а также на участках взаимного наложения опасных зон.

5. По результатам анализа характеристик пород, определяющих их газоносность и проницаемость, горно-геологических условий проявлений выбросов пород и газа в условиях рудника, неравномерности напряженно-

деформированного состояния массива установлено, что все выбросы происходили в зонах влияния геологических нарушений при наличии в контуре выработок органогенных газонасыщенных доломитов.

6. Для заблаговременного выявления участков массива, где следует ожидать ГДЯ, на рудниках следует развивать методы геологического прогноза для своевременного планирования мероприятий по приведению массива в неопасное состояние и оперативные геофизические методы прогноза состояния ГГМ.

## **Глава 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ГОРНЫХ МАССИВАХ НА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ**

### **4.1 Оценка полей напряжений в массиве горных пород рудника «Интернациональный» и постановка задачи моделирования**

Геомеханические основания внезапных выбросов в ГГМ неоднократно исследовались другими авторами, в том числе в работах [65, 66, 130, 178, 185]. При этом особое внимание уделялось анализу полей напряжений в горном массиве. Таким образом, в настоящее время в практике приняты следующие начальные условия:

- напряженное состояние верхних слоев земной коры в региональном масштабе носит литостатический характер;
- горизонтальные напряжения, как правило, остаются в пределах значений гравитационной составляющей;
- ориентацию главных максимальных напряжений нельзя точно определить без проведения полевых измерений [57].

В ходе опытно-промышленных работ оценки поля напряжений в массиве горных пород рудника «Интернациональный» на глубинах опасных по внезапным выбросам пород и газа, методы частичной скважинной разгрузки и геофизические методы показали противоречивые результаты.

На различных участках выработок в районе произошедших выбросов наблюдалось как полностью разгруженное состояние, так признаки гравитационного и тектонического поля напряжений (см. разделы 3.4 и 3.5).

По этой причине в качестве исходных данных для моделирования рассматривались разные варианты исходного поля напряжений, в том числе, базовое литостатическое ( $\sigma_1 = \gamma H$ ,  $\sigma_2 = \gamma H$ ,  $\sigma_3 = \gamma H$ ), см.

По результатам анализа натурных исследований, российского и международного опыта горных работ в условиях подобных месторождений и

глубин, приняты параметры исходного поля напряжений с незначительным преобладанием горизонтальных напряжений над вертикальными  $\sigma_1 = 1,2\gamma H$  и  $\sigma_2 = 1,1\gamma H$ ,  $\sigma_3 = \gamma H$  [211, 56-57].

При исследовании НДС вмещающего массива горных выработок на руднике «Интернациональный» на стадии постановки задачи для моделирования были выдвинуты *две гипотезы механизма формирования ГДЯ*:

1. при ведении горных работ в ГГМ на глубине 1,2-1,7 км в условиях сравнительно высоких исходных напряжений, первоначально, в зоне максимума опорного давления происходит микроудар, далее происходит выброс разрушенных пород выделившимся газом;

2. при ведении горных работ в ГГМ за контуром выработки образуются системы искусственных трещин, пересекающие естественные, в их общем объеме формируется избыточное давление газа, и при превышении давления газа сопротивлению промежуточной (запирающей) толщи пород происходит выброс (выстрел) пород газом.

Принципиальное отличие двух гипотез состоит в причинах разрушения пород в приконтурной части выработки, первая гипотеза предполагает, что причиной разрушения пород является горное давление. Вторая гипотеза предполагает, что антропогенное воздействие (например, БВР) служит инициатором ГДЯ в уже ослабленных породах.

Так как в натурных наблюдениях доступны только последствия ГДЯ, то при достаточном объеме наблюдений проверка справедливости гипотез может быть проведена путем сопоставления модельных и натурных разрушающих эффектов, в частности, объемов выбросов – размер полостей, объем выброшенной породы.

Для проверки первой гипотезы был использован опыт моделирования слоистых трещиноватых скальных массивов [56, 57], где оценка устойчивости массива проводилась по критерию прочности Хука-Брауна (Hoek-Brown model – НВ) [56-57, 100, 211]. Данный критерий является частью одноименной модели, которая классифицируется как линейно-упругая идеально-пластическая изотропная. Она присутствует в большинстве программных комплексов для

геомеханических расчетов по методу конечных элементов, в том числе, в использованном ПО Map3D.

Для оценки размеров нарушенности в массиве использован коэффициент запаса прочности КЗП (SFA – анг) [100]:

$$\text{КЗП} = \frac{(\sigma_c + q\sigma_3)}{\sigma_1}, \quad (4.1)$$

где  $\sigma_c$  — предел прочности пород на одноосное сжатие, МПа;  $\sigma_1$  — главное максимальное напряжение, МПа;  $\sigma_3$  — главное минимальное напряжение, МПа; коэффициент  $q = (1 + \sin\varphi)/(1 - \sin\varphi)$ ;  $\varphi$  — угол внутреннего трения породы в массиве, град.

Также известно, что на больших глубинах под действием больших сил сжатия вокруг выработок наблюдается образование параллельных контуру трещин (рис. 4.1). Это трещины растяжения, которые образуются несмотря на объемное сжатие. Они образуются, когда вторичное растягивающее напряжение превышает определенный предел, свойственный данной породе [100].

Это подвигло к идее оценивать не только прочность, но и деформации пород. Для примера в таблице 4.1 приведены параметры трещинообразования относительно растягивающих деформаций. Согласно источнику [100], критический порог деформаций растяжения составляет порядка  $150\mu\epsilon$  ( $\mu\epsilon = \epsilon \cdot 10^{-6}$ , где  $\epsilon$  — относительная деформация растяжения). Фактическое появление первых трещин происходит позже — при достижении значений  $(250...350)\mu\epsilon$ .

При относительной деформации растяжения  $(150...250)\mu\epsilon$  происходит образование и раскрытие трещин в ГГМ, выделение в них газа, содержащегося в последствии под избыточным давлением. Развитие трещиноватости пород по каким-либо из причин и повышение давления газа в массиве может спровоцировать ГДЯ. При этом предполагается, что граница полости от внезапного выброса будет 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.





Рисунок 4.1 – Дугообразные трещины растяжения (растрескивание) в своде подготовительной выработки (рудник «Интернациональный»)

Таблица 4.1 – Параметры растягивающих деформаций и степени раскрытия трещин в условиях глубоких рудников

Состояние массива горных пород	Деформация растяжения $\varepsilon_z$	Раскрытие трещин
Раздробленный (смятый)	$> 500 \mu\epsilon$	$> 5$ мм
Сильно нарушенный	$450\text{--}500 \mu\epsilon$	до 5 мм
Нарушенный	$350\text{--}450 \mu\epsilon$	до 2 мм
Трещиноватый	$250\text{--}350 \mu\epsilon$	$\sim 0\text{--}1$ мм
Зарождение трещины = предельная деформация растяжения	$\varepsilon_c = 150 \mu\epsilon$	Неразличимы

## **4.2 Моделирование напряженно-деформированного состояния вмещающего горного массива в условиях рудника «Интернациональный»**

Моделирование состояния массива при проведении выработок выполнялась с учетом горно-геологических условий, слоистости, прочности и качества породного массива, находящегося в естественных условиях.

Определялись зоны максимальных и минимальных напряжений, действующих во вмещающем подготовительную выработку слоистом массиве, его минимальный коэффициент запаса прочности и определить критерий растягивающих деформаций, развитие деформационных процессов во время проведения и поддержания выработок различного назначения, в т.ч. спирального съезда и автоуклона. Рассматривались также условия проведения выработки в зоне влияния разлома.

Геометрические и геомеханические параметры модели принимались согласно представленной рудником «Интернациональный» технической информации. Модель создавалась по данным проектной документации, в т.ч. на подготовку и отработку новых блоков (рис. 4.2) в условиях опасных по проявлению ГДЯ. Модель включает в себя горный массив с выработками различного назначения в диапазоне абс. отм. -810 м / -1310 м ( $H = 1210-1710$  м) и автоуклон (АУ) в абс. отм. -830 м / -1330 м ( $H = 1230-1730$  м). Рассмотрены также условия пересечения данными выработками разломных зон.

Параметры построения модели:

- высота выработок  $H$  — 4,5 м (с учетом реальных условий и ухода от проектного сечения выработки высота в модели может изменяться до 8 м);
- ширина выработок  $B$  — 5,7 м (с учетом реальных условий и ухода от проектного сечения ширина может изменяться в диапазоне до 10 м);
- мощность выбросоопасного слоя доломита (бежевого) — 4,7 м;
- угол падения слоём пород —  $0-3^\circ$ ;
- глубина от поверхности — 1210-1730 м;

- действующие исходные напряжения в массиве на глубине от поверхности 1200 м  $\sigma_1 = 36$  МПа,  $\sigma_2 = 33$  МПа,  $\sigma_3 = 30$  МПа (минимальные вертикальные);
- действующие исходные напряжения в массиве на глубине от поверхности 1700 м  $\sigma_1 = 51$  МПа,  $\sigma_2 = 46,75$  МПа,  $\sigma_3 = 42,5$  МПа (минимальные вертикальные).

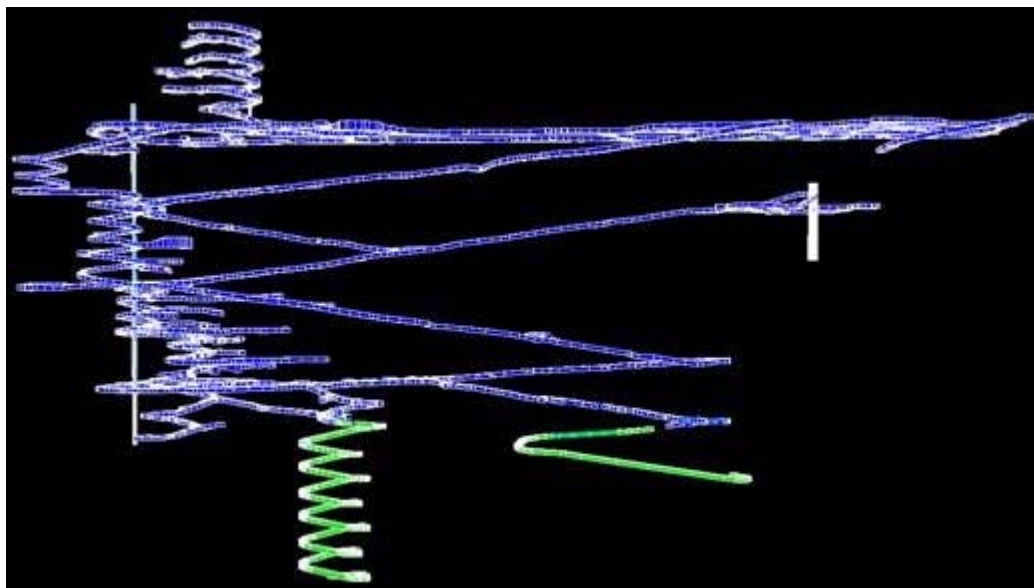


Рисунок 4.2 – Система выработок, построенная по результатам проведенных маркшейдерских съёмок и планируемая схема проведения выработок: синий цвет – пройденные выработки; зеленый – планируемые

Уточнение физико-механических характеристик массива в естественном залегании для моделирования выполнялось в программном комплексе RocData, где расчеты велись с применением критериев прочности Хука-Брауна и Кулона-Мора, а геомеханическое поведение массива описывалось моделью разрушения по теории Можи [57].

Прочностные свойства горных пород подготавливались в ПО RocData (табл. 4.2, 4.3). При расчетах подставлялся индекс геологической прочности GSI – исходный параметр, определённый при картировании массива на забое выработок (рис. 4.3), а также индекс нарушенности массива D (табл. 4.4) для условий проведения выработок при БВР.

Таблица 4.2 – Исходные данные по физико-механическим свойствам выбросоопасного доломита бежевого

Параметр	В массиве	В разломной зоне
Предел прочности на сжатие	65 МПа (в образце)	65 МПа (в образце)
GSI (геологический индекс прочности)	70	35
Структурный индекс $m_i$	10	10
Модуль деформации (Юнга)	25 ГПа (в образце)	25 ГПа (в образце)
Сцепление	3,98 МПа	1,381 МПа
Угол внутреннего трения	33,346°	15,144°
Постоянная Хука – Брауна, $m_b$	2,397	0,209
Постоянная Хука – Брауна, $s$	0,018	0,00005
Постоянная Хука – Брауна, $a$	0,501	0,516
Удельный вес пород	0,025 МН/м <sup>3</sup>	0,025 МН/м <sup>3</sup>
Режим природных напряжений	Литостатический	
Глубина горных работ от земной поверхности	1210–1730 м	

Таблица 4.3 – Исходные данные по физико-механическим свойствам невыбросоопасного доломита серого

Параметр	В массиве	В разломной зоне
Предел прочности на сжатие	83 МПа (в образце)	83 МПа (в образце)
GSI (геологический индекс прочности)	80	40
Структурный индекс $m_i$	10	10
Модуль деформации (Юнга)	30 ГПа (в образце)	30 ГПа (в образце)
Сцепление	6,72 МПа	2,043 МПа
Угол внутреннего трения	37,081°	17,071°
Постоянная Хука – Брауна, $m_b$	3,858	0,281
Постоянная Хука – Брауна, $s$	0,069	0,0001
Постоянная Хука – Брауна, $a$	0,501	0,511
Удельный вес пород	0,025 МН/м <sup>3</sup>	0,025 МН/м <sup>3</sup>
Режим природных напряжений	Литостатический	
Глубина горных работ от земной поверхности	1210–1730 м	

Таблица 4.4 – Коэффициент техногенной нарушенности массива D

Значение D	Описание
D = 0	Минимальные нарушения, механический способ проходки выработок
D = 0,5	Буровзрывной способ проходки выработок
D = 0,8	Выработка после БВР с нарушением приконурной части на глубину до 2-3 м



Рисунок 4.3 – Слоистая структура массива, сложенная бежевыми и серыми доломитами на участке спирального спуска

При проведении вычислительных экспериментов с построенной геомеханической моделью (рис. 4.4) вмещающего массива спирального съезда (рис. 4.5) и автоуклона (рис. 4.6) оценка напряжённо-деформированного состояния проводилось по 14 вычислительным сеткам – по 7 на спиральном съезде и автоуклоне. Соответственно, рассматривались схемы: вертикальное сечение по оси выработки на рисунке 4.7 и 4.12; вертикальное сечение на расстоянии 4 м от забоя на рисунке 4.8 и 4.13; горизонтальное сечение под кровлей, в средней части и у почвы выработки на рисунке 4.9 и 4.14; горизонтальное сечение по почве выработки на рисунке 4.10 и 4.15.

Также промоделировано взаимное влияние двух спиралей съезда (рис. 4.11) и двух участков автоуклона за поворотом (рис. 4.16).

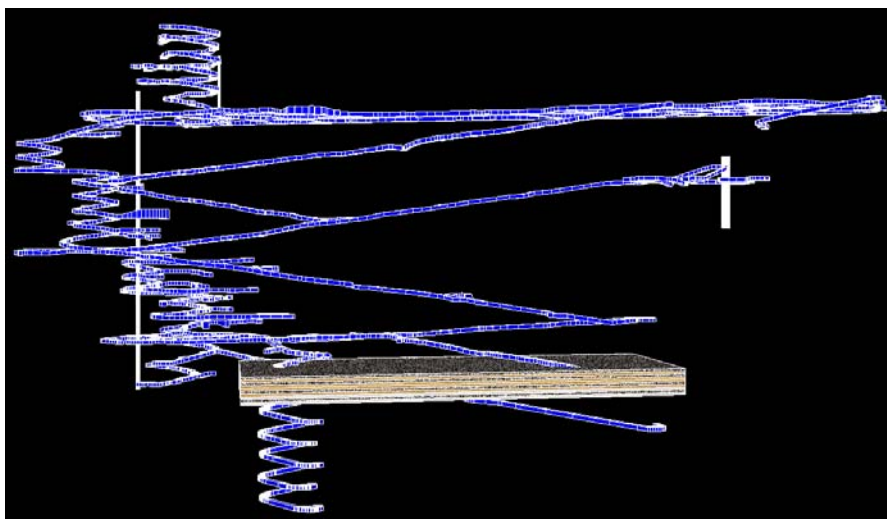


Рисунок 4.4 — Система выработок различного назначения и слоистый массив на глубине 1210-1230 м

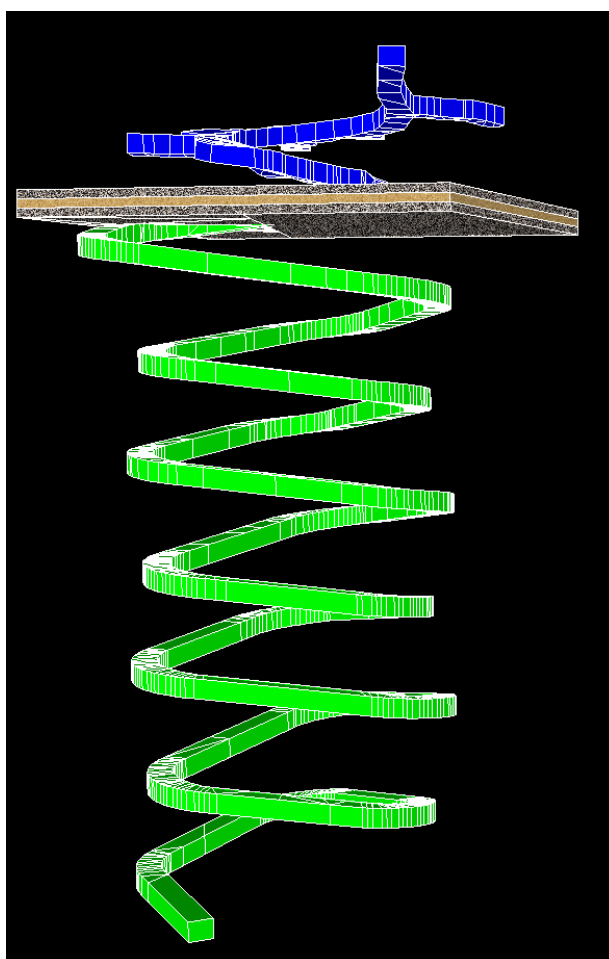


Рисунок 4.5 — Спиральный съезд в отм. -810 м / -1310 м  
(синий цвет — пройденные выработки;  
зеленый — планируемые)

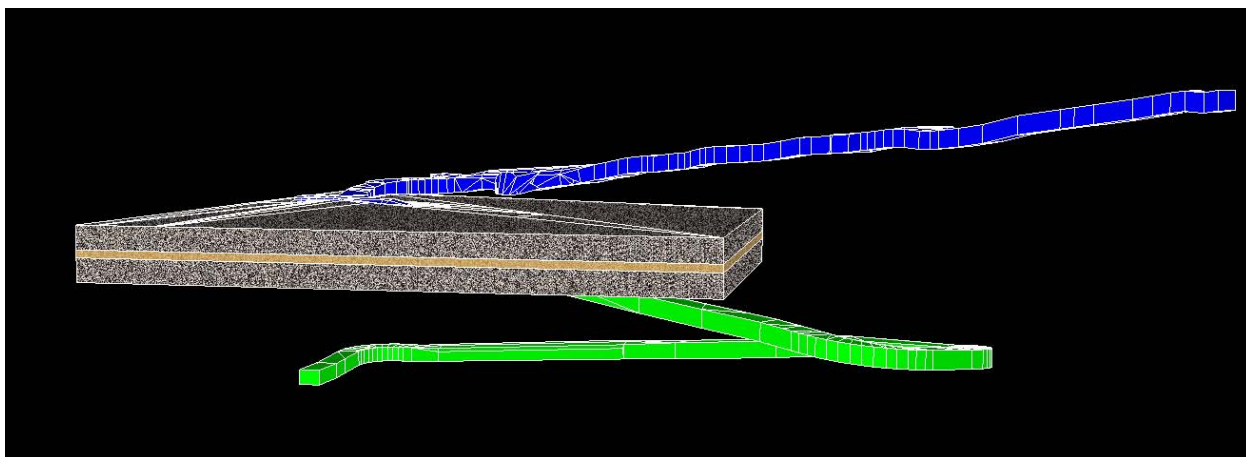


Рисунок 4.6 — автоуклон и слоистый массив, который вмещает забой выработки на глубине 1230 м. Синий цвет – пройденные выработки; зеленый – планируемые

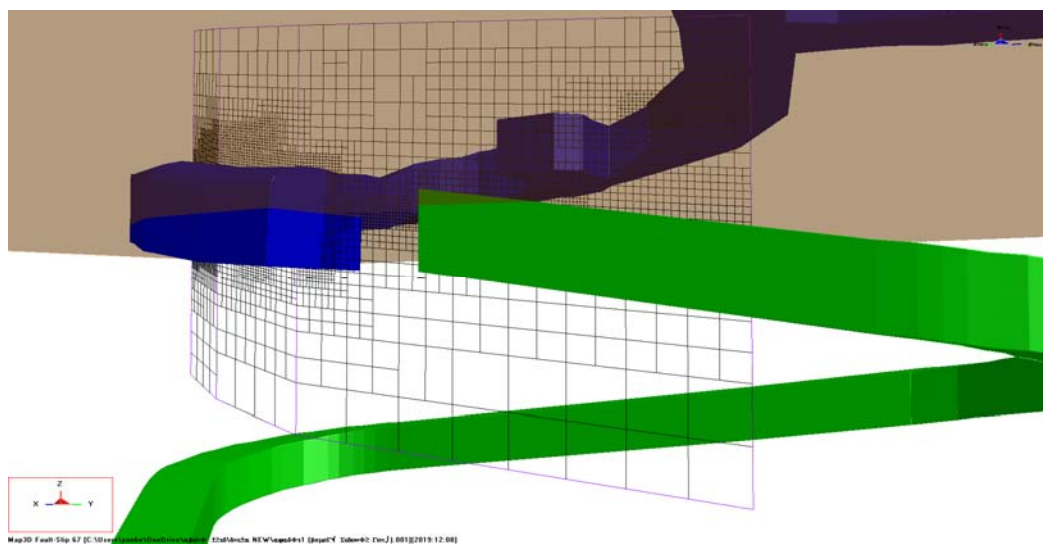


Рисунок 4.7 — Вычислительная сетка 1.1 на спиральном съезде

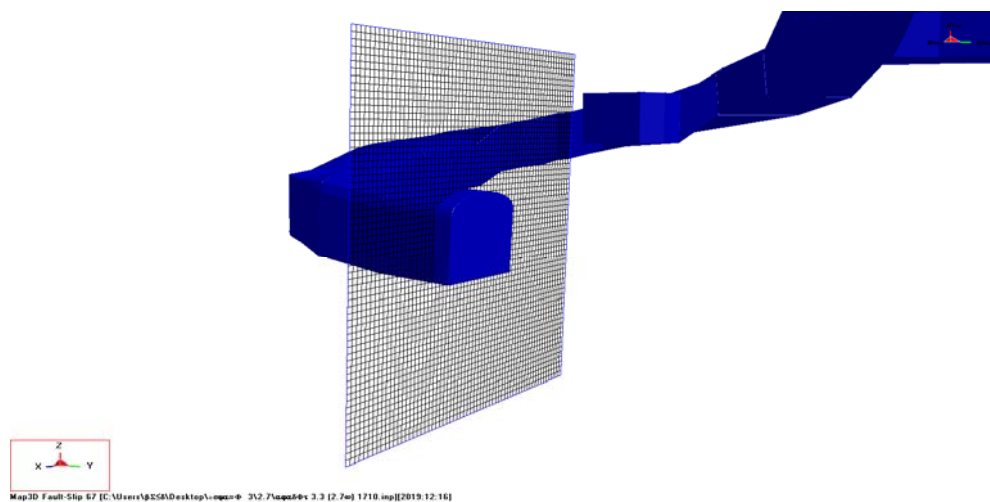


Рисунок 4.8 — Вычислительная сетка 1.2 на спиральном съезде



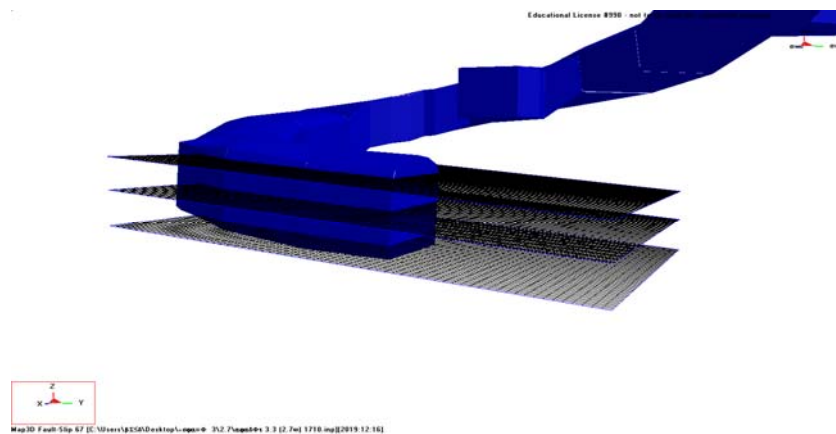


Рисунок 4.9 — Вычислительные сетки 1.3–1.5 (нумерация сверху вниз) на спиральном съезде

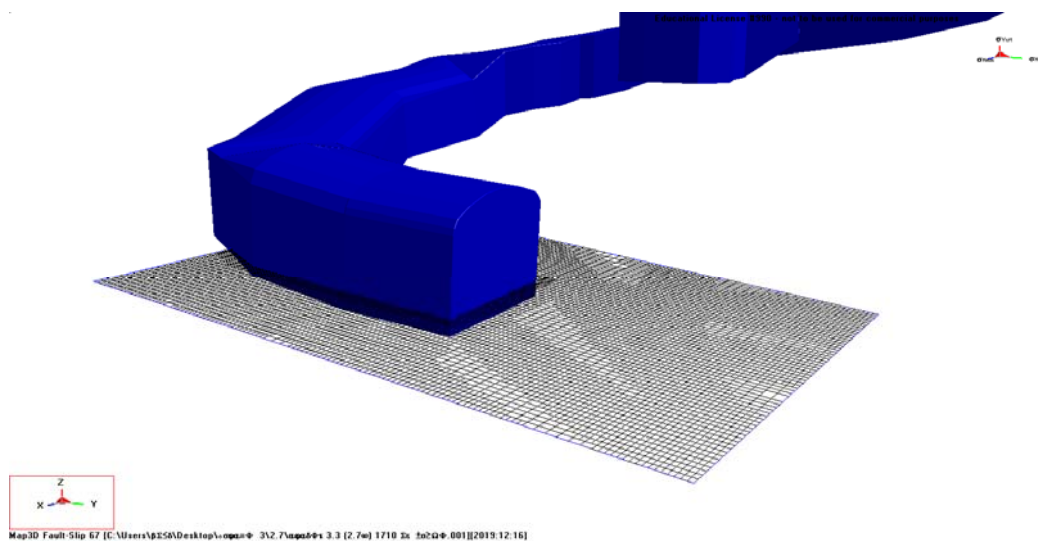


Рисунок 4.10 — Вычислительная сетка 1.6 на спиральном съезде

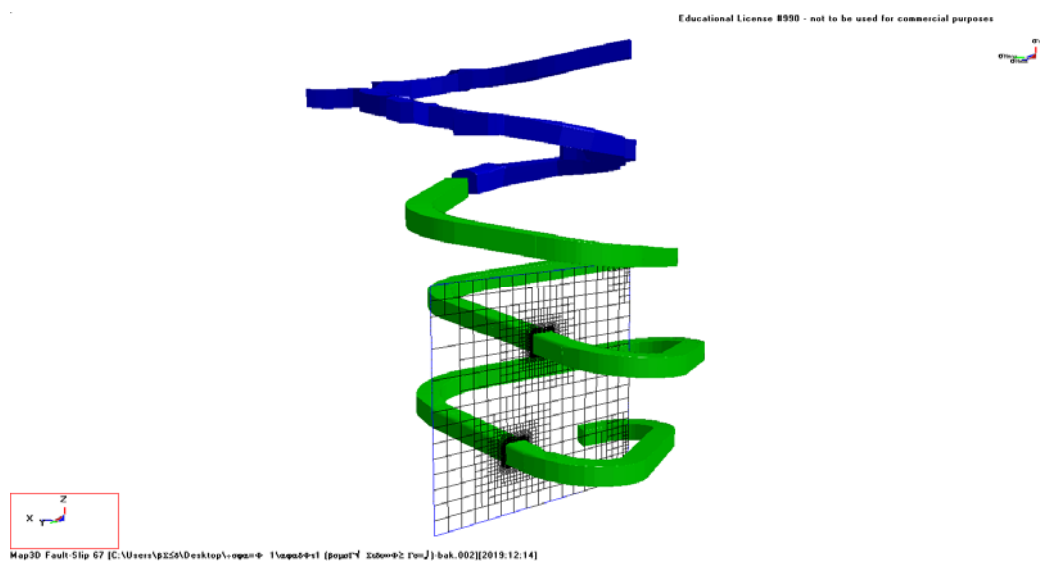


Рисунок 4.11 — Вычислительная сетка 1.7 на спиральном съезде



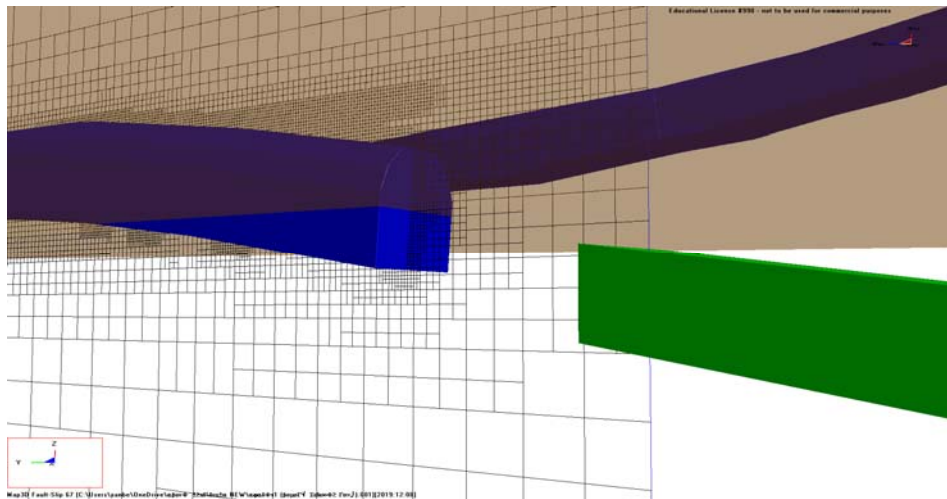


Рисунок 4.12 — Вычислительная сетка 2.1 на автоуклоне

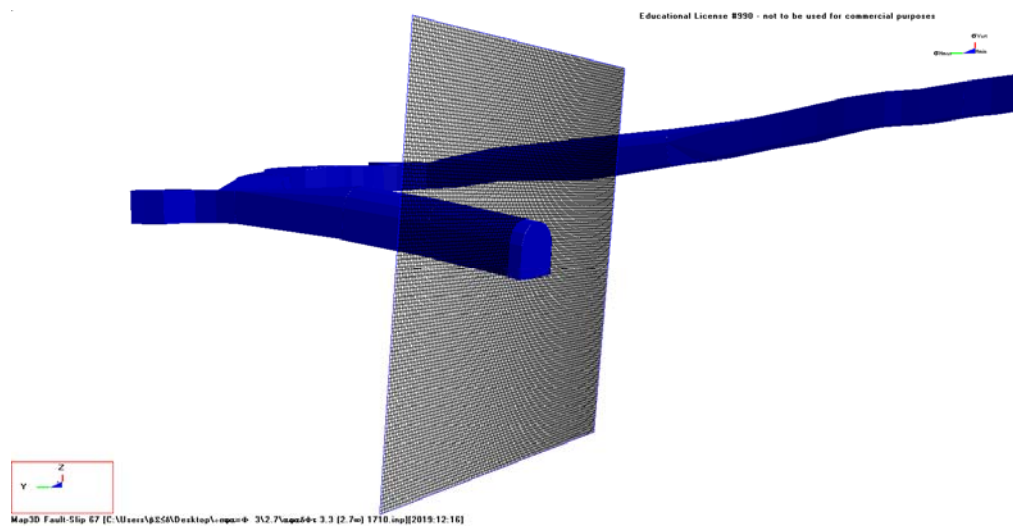


Рисунок 4.13 — Вычислительная сетка 2.2 на автоуклоне

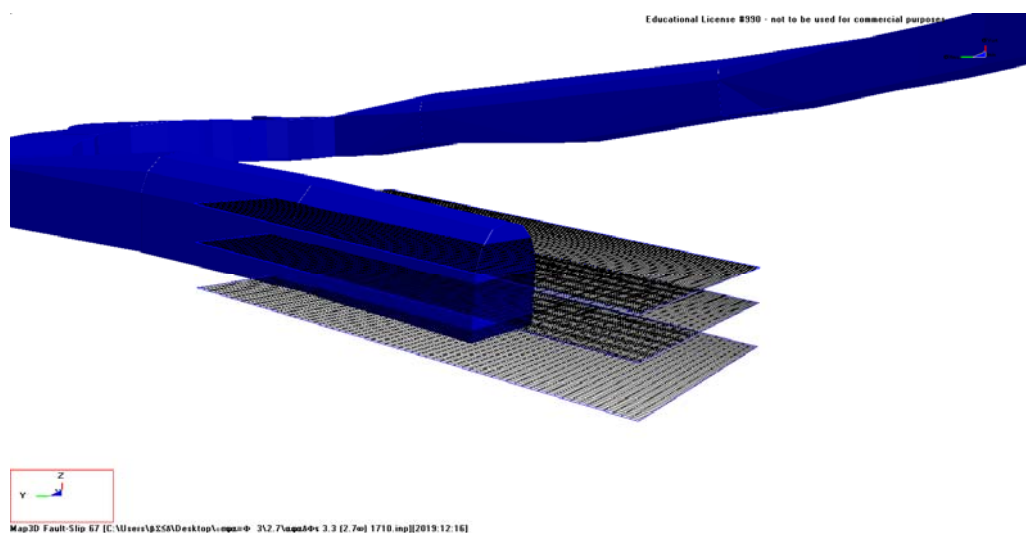


Рисунок 4.14 — Вычислительные сетки 2.3–2.5 (нумерация сверху вниз) на автоуклоне

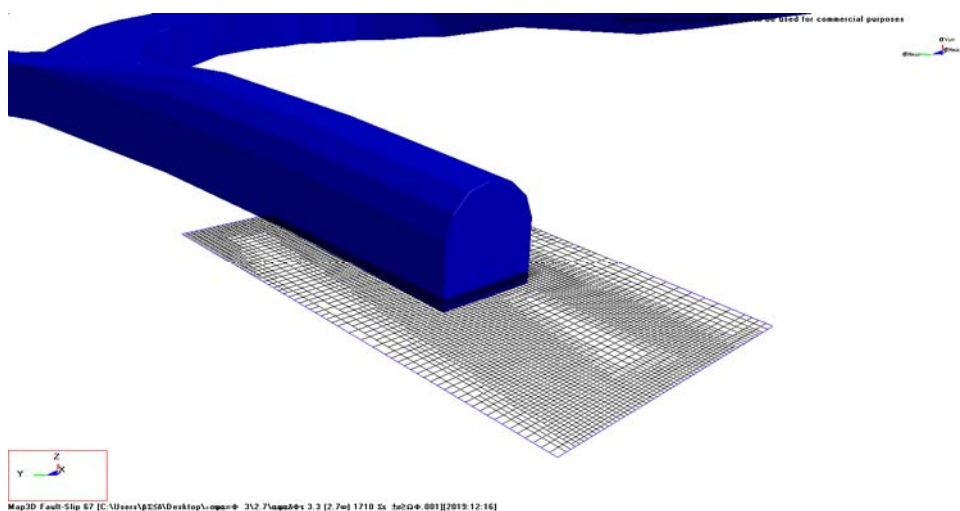


Рисунок 4.15 — Вычислительная сетка 2.6 на автоуклоне

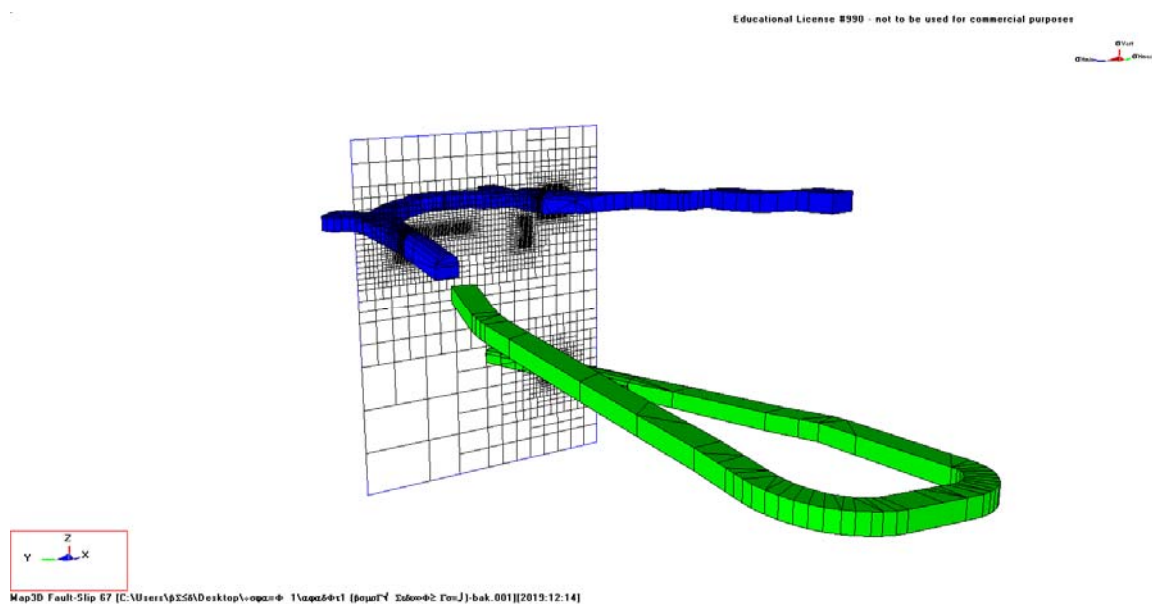


Рисунок 4.16 — Вычислительная сетка 2.7 на автоуклоне

Расчеты выполнялись для следующих сценариев взаимного положения выработок и выбросоопасных слоёв доломита (рис. 4.17):

- 1) нисходящей выработкой на половину пересечён мощный слой выбросоопасного доломита (бежевого) 4 м;
- 2) слой выбросоопасного доломита (бежевого) мощностью 2 м находится в средней части забоя;
- 3) вскрытие слоя выбросоопасного доломита мощностью 3 м на 1,5 м;
- 4) вскрытие слоя выбросоопасного доломита мощностью 3 м на 1 м;
- 5) вскрытие слоя выбросоопасного доломита мощностью 3 м на 0,5 м;
- 6) вскрытие слоя выбросоопасного доломита мощностью 3 м.

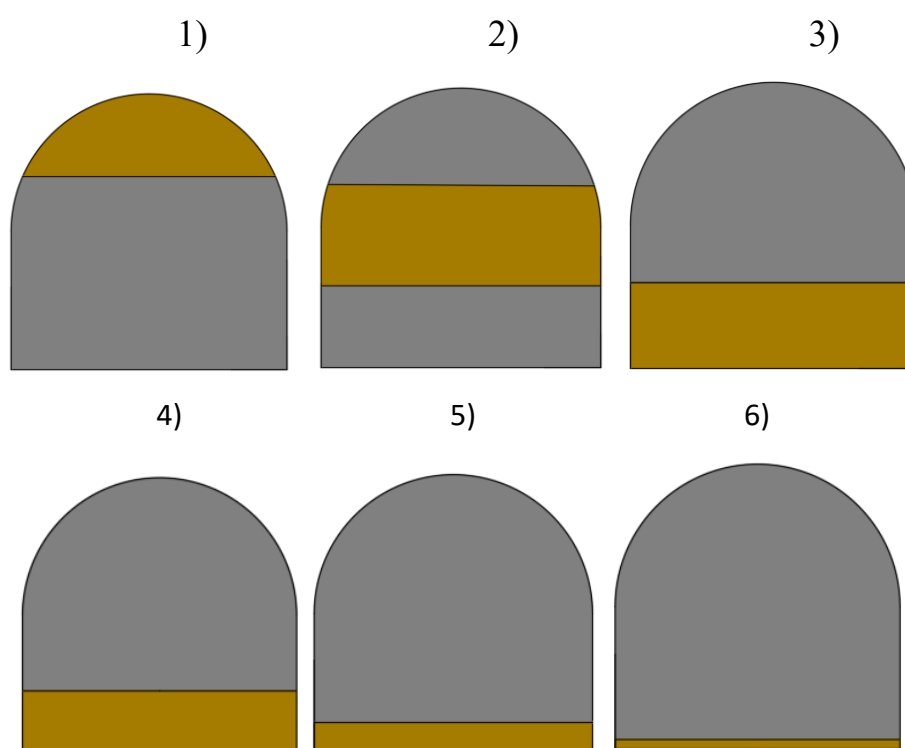


Рисунок 4.17 — Сценарии взаимного положения выработок и выбросоопасных слоёв доломита забой выработки (1–6)

Результаты моделирования по показателям  $\sigma_1$ ,  $\Delta\sigma_1$ , КЗП и  $\varepsilon_3$  для одного вида сетки представлены на рисунках 4.18–4.21.

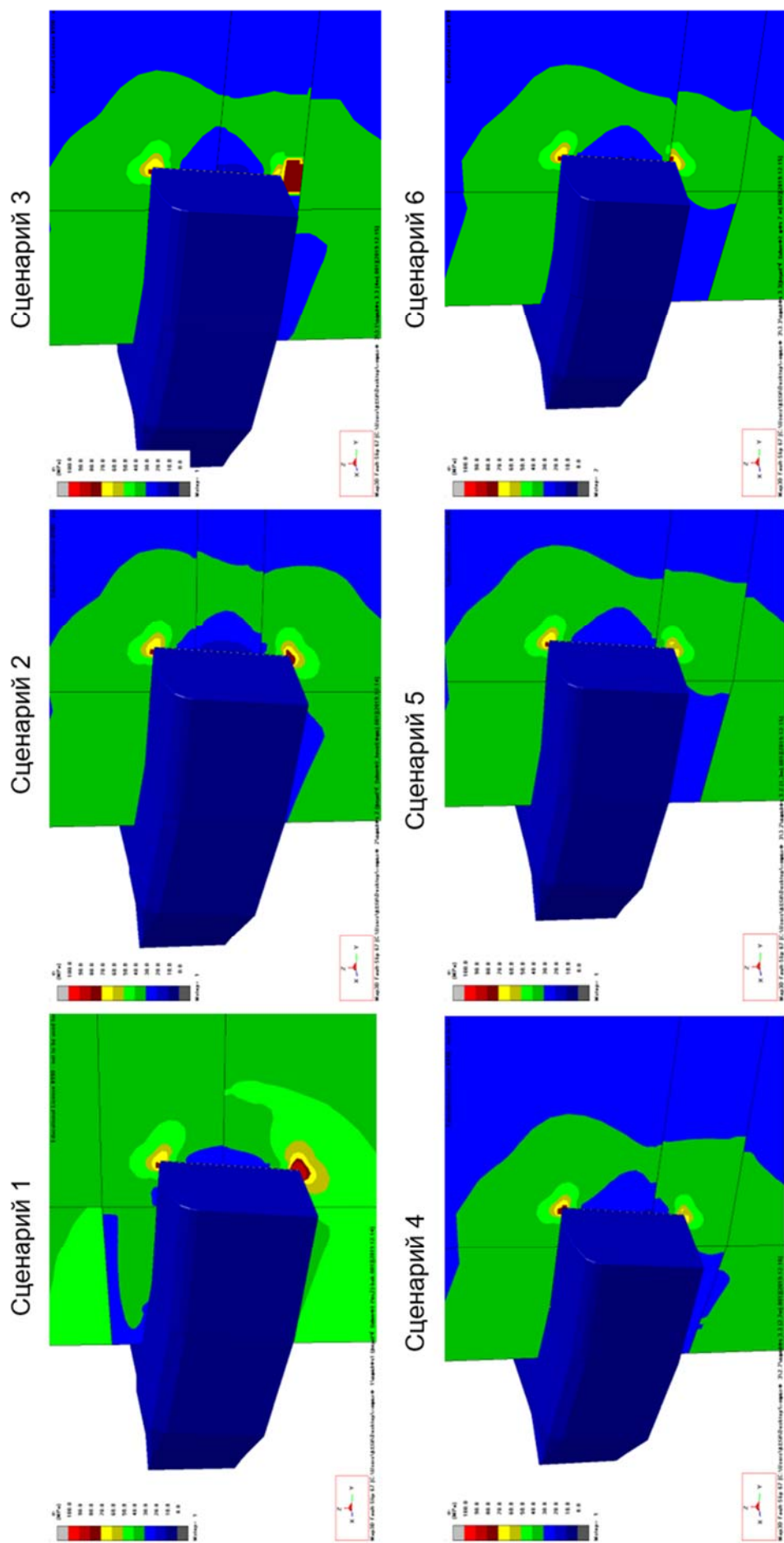


Рисунок 4.18 — СС, сетка 1.1. Сценарии 1–6, сетка 1210 м от земной поверхности

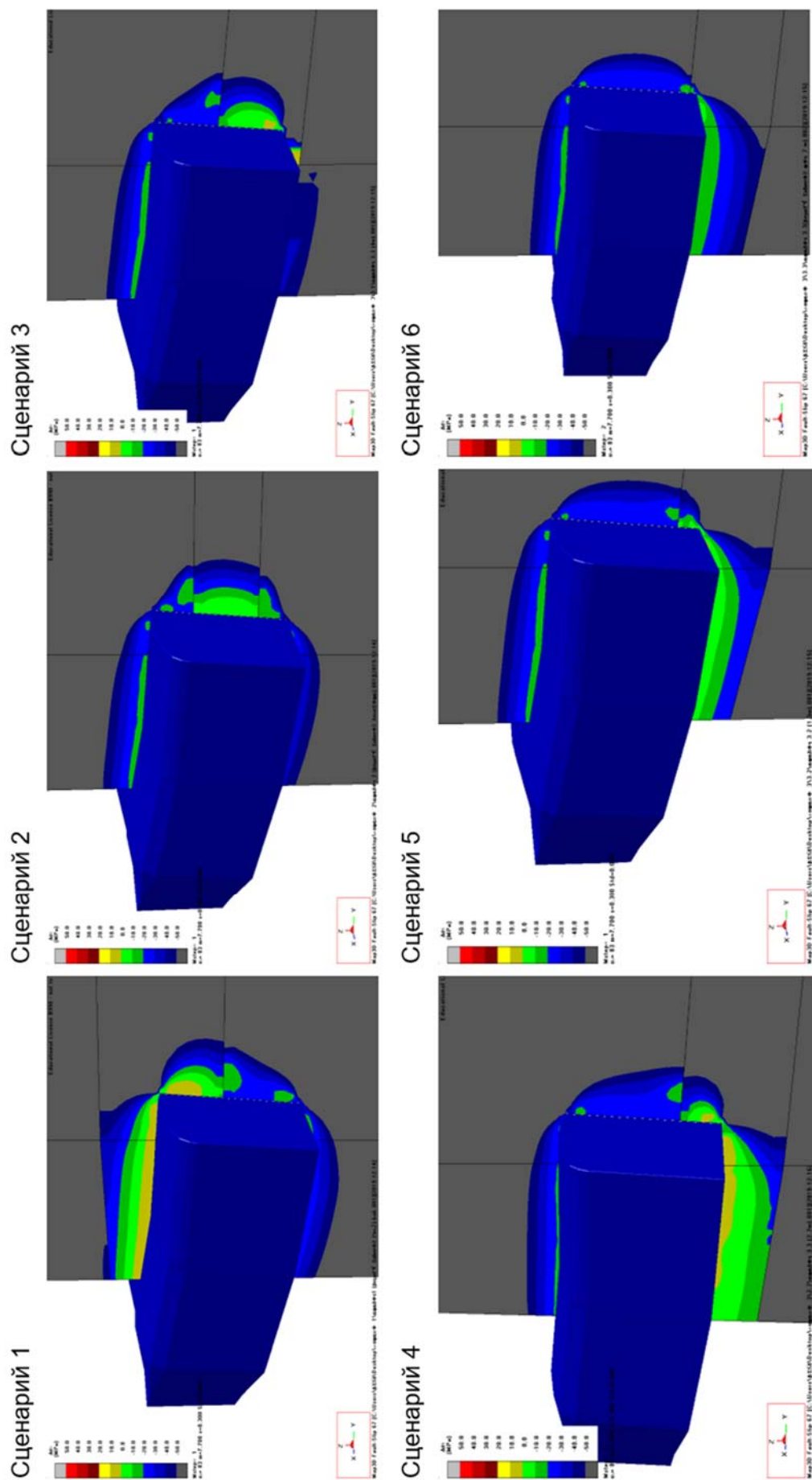


Рисунок 4.19 — СС, сетка 1.1. Сценарии 1–6, глубина 1210 м от земной поверхности

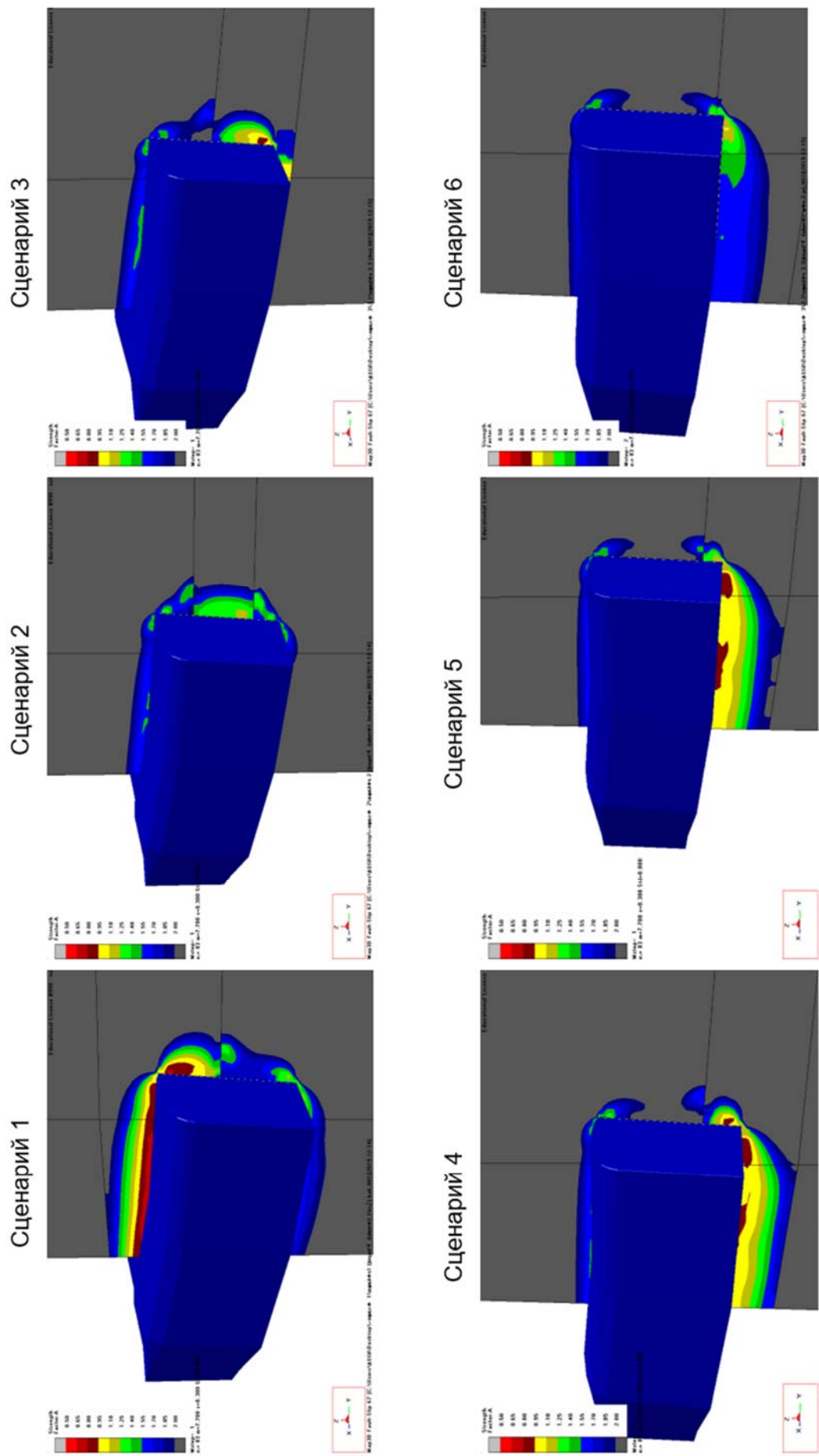


Рисунок 4.20 — СС, сетка 1.1. Сценарии 1–6, КЗП, глубина 1210 м от земной поверхности



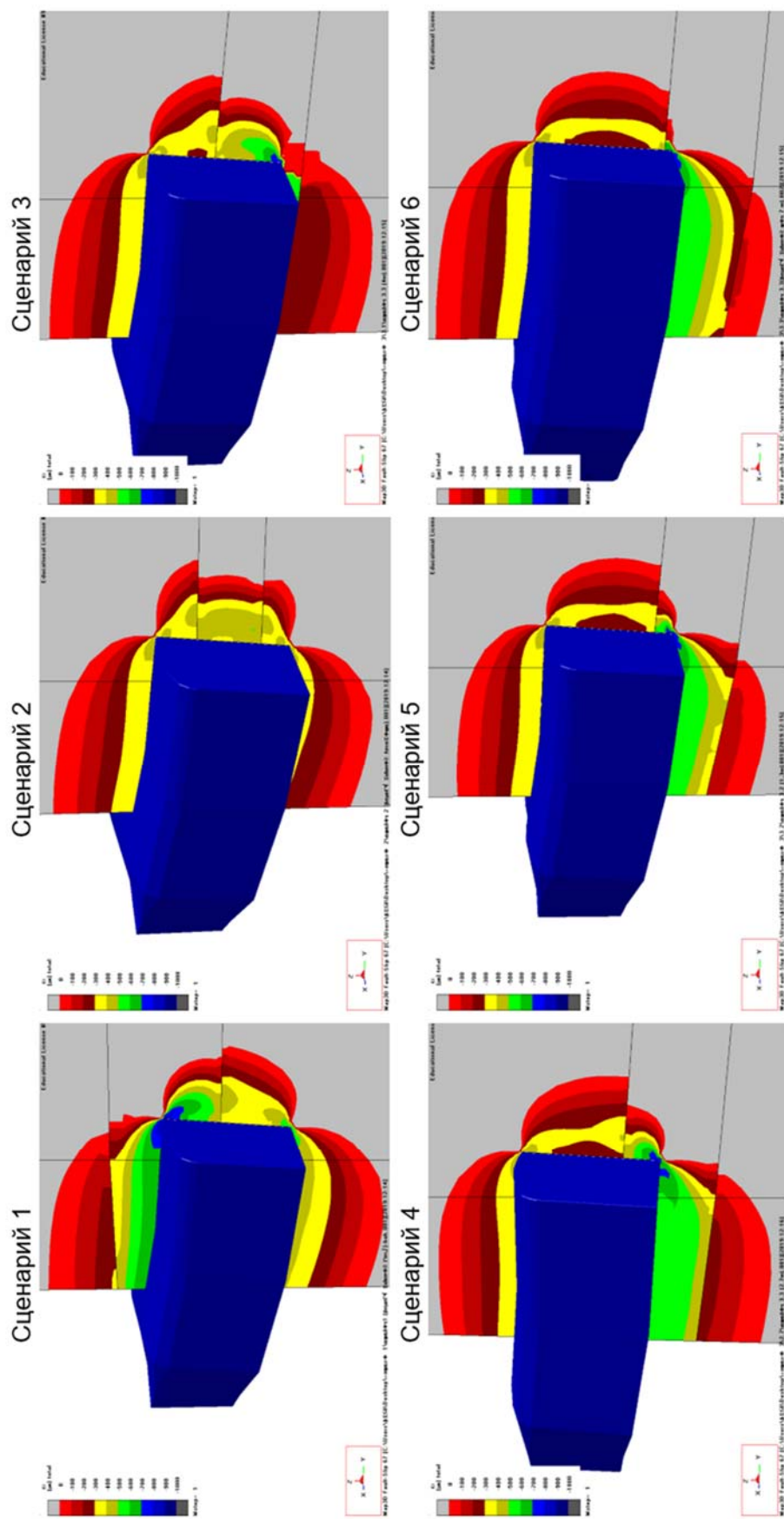


Рисунок 4.21 — СС, сетка 1.1. Сценарии 1–6,  $\varepsilon_3$ , глубина 1210 м от земной поверхности

Всего выполнено 336 расчетов. В таблице 4.5 приводятся результаты моделирования, где  $\sigma_1$  — величина избыточного напряжения,  $\Delta\sigma_1$  — величина избыточного напряжения (свыше предела прочности горной породы), КЗП — коэффициент запаса прочности,  $\mu\epsilon$  — наименьшие главные деформации  $\epsilon_3$ , которые развиваются в направлении  $\sigma_3$  (закон Гука  $\sigma_3 = E \cdot \epsilon_3$ ).

Таблица 4.5 — Результаты моделирования НДС

Сетка	Параметры НДС	Результат моделирования
<b>Сценарий 1</b>		
1.1 и 2.1	$\sigma_1$	Превышения напряжения в сером доломите не наблюдается, а в бежевом доломите в кровле выработки и в верхней части забоя оно достигает 10 МПа
1.2 и 2.2	$\Delta\sigma_1$	В сером доломите все в пределах нормы, в бежевом доломите превышение в кровле и боках выработки достигает 10 МПа
1.3 и 2.3	$\Delta\sigma_1$	В бежевом доломите превышение в боках выработки, худшая ситуация с внутренней стороны спиральной выработки. Превышение достигает 10 МПа
1.4 и 2.4	$\Delta\sigma_1$	В сером доломите превышения отсутствуют
1.1 и 2.1	КЗП	В бежевом доломите КЗП < 1 в кровле выработки и в верхней части забоя от его груди в массив, поэтому горная порода будет нарушена и в забое, и в кровле. КЗП в бежевом доломите ниже, чем в сером. В верхней части выработки ожидаются негативные проявления горного давления
1.2 и 2.2	КЗП	КЗП < 1 в бежевом доломите на глубине 1210 и 1230 м в кровле выработки. В верхней части выработки ожидаются негативные проявления горного давления
1.3 и 2.3	КЗП	КЗП < 1 в бежевом доломите на глубине 1210 и 1230 м в боках выработки горная порода будет нарушена. Выявлено, что бока выработки подвержены избыточному давлению — следует ожидать разрушения приконтурного массива выбросоопасного пласта бежевых доломитов
1.4 и 2.4	КЗП	КЗП < 1 в сером доломите на глубине 1210 и 1230 м в боку выработки с внутренней стороны спирали горная порода может быть нарушена
1.1 и 2.1	$\mu\epsilon$	В бежевом доломите в кровле выработки регистрируются зоны, где микродеформации $\mu\epsilon > 500-700$ . Размеры зоны $\mu\epsilon = 150..250$ в выбросоопасных слоях доломита больше остальных в сценариях 1 и 6. В связи с этим они представляются худшими с позиции потенциала ГДЯ
1.2 и 2.2	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon > 500-700$ в бежевом доломите на глубине 1210 и 1230 м в кровле выработки до пят ее свода
1.3 и 2.3	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon > 500-700$ в бежевом доломите на глубине 1210 и 1230 м в боках выработки и в забое
1.4 и 2.4	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon > 500$ в сером доломите на глубинах 1210 и 1230 м



Сценарий 2		
1.1 и 2.1	$\sigma_1$	В сером доломите напряжения не выходят за пределы прочности, в бежевом доломите по забою предел прочности незначительно превышен
1.2 и 2.2	$\Delta\sigma_1$	В сером доломите не выходят за пределы прочности, в бежевом доломите по бортам выработки предел прочности незначительно превышен
1.3 и 2.3	$\Delta\sigma_1$	В сером доломите все в пределах нормы
1.4 и 2.4	$\Delta\sigma_1$	В бежевом доломите превышение по бортам выработки
1.1 и 2.1	КЗП	$KЗП \geq 1$ в забое выработки, поэтому горная порода не будет нарушена. Очевидно, что КЗП в бежевом доломите ниже, чем в сером
1.2 и 2.2	КЗП	$KЗП \geq 1$ в сером доломите в боках выработки
1.3 и 2.3	КЗП	$KЗП \geq 1$ в бежевом доломите
1.4 и 2.4	КЗП	$KЗП < 1$ в бежевом доломите в боку выработки с внутренней стороны спирали горная порода может быть нарушена
1.1 и 2.1	$\mu\epsilon$	В бежевом и сером доломите микродеформации $\mu\epsilon < 500$
1.2 и 2.2	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon < 500$ в бежевом доломите в боках выработки
1.3 и 2.3	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon < 500$ в сером доломите в боку выработки с внешней стороны спирали
1.4 и 2.4	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon > 500$ в бежевом доломите в боках и забое выработки
Сценарии 3–6		
1.1 и 2.1	$\sigma_1$	В сером доломите напряжение в пределах нормы, в бежевом доломите превышение в почве и в нижней части забоя. Худшая ситуация (наиболее протяженная зона по простиранию выработки) складывается при вскрытии выбросоопасного слоя на 1 м, менее напряженная ситуация при вскрытии на 1,5 м. Почва выработки в данных сценариях наиболее уязвима, находится в условиях высокого горного давления и является участком, склонным к ГДЯ
1.2 и 2.2	$\Delta\sigma_1$	В сером доломите все в пределах нормы, в бежевом доломите превышение в почве и нижних частях боков выработки. Картина примерно одинаковая при всех четырех сценариях, но, вероятно, худший сценарий 4 и 3, так как выбросоопасный слой доломита вскрыт на 1 м и 1,5 м соответственно, что является максимальным во всех четырех сценариях, соответственно объем доломита с изменённым НДС больше. Следует отметить, что наибольшие избыточные напряжения регистрируются в 6 сценарии
1.4 и 2.4	$\Delta\sigma_1$	В сером доломите превышения отсутствуют
1.5 и 2.5	$\Delta\sigma_1$	В бежевом доломите превышения в боках и забое выработки. Худший сценарий 4, большие избыточные напряжения регистрируются с внутренней стороны спирали
1.1 и 2.1	КЗП	В бежевом доломите $KЗП < 1$ в почве выработки и в нижней части забоя от его груди в массиве, поэтому горная порода будет нарушена и в забое, и в почве. КЗП в бежевом доломите ниже, чем в сером. Выявлено, что почва выработки более подвержена избыточному давлению — порода из почвы может быть выдавлена в выработку. Худший сценарий 4

1.2 и 2.2	КЗП	В бежевом доломите по почве выработки КЗП $< 1$ и ниже, чем в сером. Почва выработки более подвержена избыточному давлению — порода из почвы может быть выдавлена в выработку
1.4 и 2.4	КЗП	КЗП $> 1$ в сером доломите, в боках выработки все в пределах нормы
1.5 и 2.5	КЗП	КЗП $< 1$ в бежевом доломите в боках и забое выработки горная порода будет нарушена. Выявлено, что бока выработки подвержены избыточному давлению — следует ожидать разрушения приконтурного массива выбросоопасного слоя бежевых доломитов. Наиболее худший сценарий 4
1.1 и 2.1	$\mu\epsilon$	В бежевом доломите в почве выработки микродеформации $\mu\epsilon > 500$ . Размеры зоны $\mu\epsilon = 150..250$ в выбросоопасных слоях доломита больше остальных в сценариях 1 и 6. В связи с этим они представляются худшими с позиции потенциала ГДЯ
1.2 и 2.2	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon > 500$ в бежевом доломите в угловых частях почвы выработки
1.4 и 2.4	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon < 500$ в сером доломите все в пределах нормы
1.5 и 2.5	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon > 500$ в бежевом доломите на глубине 1210 и 1230 м трещины растяжения образуются в боках выработки. Худший по величине разгрузки пород боков сценарий 4

Анализ результатов численного моделирования показывает, что распределение напряжений, КЗП и деформаций при сравнении доломитов и выработок на спиральном съезде и автоуклоне качественно совпадают.

Установлено, что наиболее опасные ситуации по ГДЯ формируются при вскрытии выбросоопасных слоёв нисходящей выработкой, а также при его пересечении, когда слой оказывается в кровле. Опасность в данном случае определяется объёмом пород, отторжение которых может произойти при ГДЯ. Объём выброса в большей степени определяется мощностью выбросоопасного слоя.

При вскрытии слоя (сценарий 6) в почве наблюдается максимальных размеров зона деформации растяжения  $(150...250)\mu\epsilon$ . Это означает интенсивное образование новых трещин и рост давления газа в формирующемся коллекторе значительного объёма. Далее по мере подвигания выработки (сценарии 5 и 4) происходит разгрузка, трещинообразование и снижение КЗП уже в непосредственной почве выработки.

В условиях вскрытия слоя выбросоопасного доломита забоем на 1 м (сценарий 4, рис. 4.17) происходит разгрузка на всю его мощность. Именно в этих

условиях при последовательном снижении прочности и уменьшении ширины запирающего слоя пород создаются условия для внезапного выброса пород и газа. Дальнейшее вскрытие на 1,5 м к ухудшению ситуации не приводит, т.к. в почве выработки выбросоопасный слой находится уже в полностью разгруженном состоянии. Проявления ГДЯ со стороны забоя выработки все еще возможно, но оцениваемый объем выброса существенно меньше.

Сценарий (2) с размещением слоя в средней части выработки по проявлению ГДЯ менее опасный, т.к. слой уже частично разгружен, и в зоне опорного давления прорастают трещины, особенно на контакте литологических разностей, снижая давление газа в коллекторах. Тем не менее вероятность проявления ГДЯ сохраняется, однако оцениваемый объем выброса намного меньше, чем при вскрытии слоя.

Таблица 4.6 — Параметры разрушения контура выработок по результатам моделирования и по фактическим данным

Положение	Глубина полости, м		Объем выброшенной породы, м <sup>3</sup>	
	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

Сравнительный анализ объемов выброшенной породы по результатам обработки актов комиссий по расследованию газодинамических явлений на руднике «Интернациональный» (см. выше) и результатов моделирования показывает, что параметры полостей различаются по форме и в 3–5 раз по размеру (табл. 4.6). То есть неучтенные в геомеханической модели газодинамические процессы играют в формировании выбросов существенную роль. Таким образом, вторая гипотеза получает косвенное подтверждение.

### **4.3 Способы защиты выработок от разрушающего воздействия ГДЯ**

В результате моделирования установлено, что породы кровли выработки наиболее подвержены деформациям и наименее устойчивы при положении по сценарию 1. Проявление ГДЯ наиболее вероятно в кровле, в непосредственной близости у забоя и может спровоцировать обрушение значительного объёма пород на участке, разгруженном выработкой, что также неоднократно наблюдалось на практике. Для предотвращения таких явлений следует применять эффективные меры по предотвращению ГДЯ и крепь, прособную противостоять динамическим нагрузкам.

Установлено, что на объём выброса пород при ГДЯ помимо мощности выбросоопасного слоя из-за своего разгружающего действия существенно влияют размеры выработок. В связи с этим, применяемые сечения выработок рекомендуется минимизировать с учётом технологических возможностей и проветривания.

Из опыта ведения горных работ в схожих условиях и моделирования при максимальных напряжениях на контуре выработки, достигающих 30 % от предела прочности горной породы, крепь не требуется; при 50 % и более уже выработки уже следует крепить; при 80 % и более массив интенсивно разрушается и требует обязательного крепления.

В условиях проявления ГДЯ по аналогии с ведением горных работ на удароопасных месторождениях параметры крепи выработок должны предусматривать возможные динамические нагрузки. «Динамическая» крепь должна сохранить свою несущую способность и обеспечить работоспособное состояние поддерживаемых выработок до и после ГДЯ. Наиболее эффективного поддержания выработок в условиях выбросоопасных доломитов можно добиться за счёт поэтапного крепления выработок.

Первоначально применяется крепь с высокой способностью поглощения энергии. Это достигается применением специальных типов анкеров,

например, конические анкеры (cone bolt, рис. 4.22) в сочетании с опорными элементами и поверхностной крепью с соответствующими характеристиками на разрыв и прорыв. Принцип работы конических анкеров заключается в том, что на головном конце имеется узел уширения конической формы и закрепление анкера происходит в связи с распором минеральной смеси в шпуре, а технология установки практически аналогична железобетонным штангам. При проявлении динамического явления высокое энергопоглощение обеспечивается за счёт не только высокой несущей способности стержня, но и податливости анкерной крепи до 300 мм. Такая податливость без снижения несущей способности достигается в результате разрушения конусом застывшего раствора в шпуре и смещении крепи вместе с массивом.



Рисунок 4.22 – Конический анкер

Для сохранения работоспособности крепи и эксплуатационного состояния выработки необходима высокопрочная поверхностная крепь со схожими параметрами. Эффективным способом является использование защитной сети MINAX (рис. 4.23) с энергопоглощением до  $6,5 \text{ кДж/м}^2$  при допустимых смещениях до 300 мм и более. Данный материал разработан специально для условий с динамическими нагрузками.

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 и перераспределяет нагрузки между элементами крепи, которые были задействованы между собой неравномерно.



Рисунок 4.23 — Высокопрочная сеть MINAX

Задача первого этапа крепи максимально сохранить устойчивость выработки при ГДЯ, на втором этапе уже в разгруженном массиве на расстоянии 30-50 м от забоя провести усиление крепи с применением канатных анкеров для эффективного её поддержания в течение срока службы.

#### **4.4 Выводы по главе 4**

1. По результатам численного моделирования установлено, что с точки зрения количественных характеристик НДС худшая геомеханическая ситуация складывается при двух сценариях: вскрытие выбросоопасных слоёв нисходящей выработкой, а так же при их переходе, когда слой остаётся в кровле. Значения деформации растяжения 150-250  $\mu\epsilon$  определяют границы потенциально опасных

зон, где происходит интенсивное образование новых трещин и рост давления газа в формирующихся коллекторах. Установлено, что на объём выброса пород при ГДЯ помимо мощности выбросоопасного слоя из-за его разгружающего действия существенно влияют размеры выработок. В связи с этим, применяемые сечения выработок рекомендуется минимизировать.

2. 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.

3. Согласно проведенному исследованию, объемы выброшенной породы в результате произошедших ГДЯ и по данным моделирования значительно отличаются – до 3–5 раз, т. е. неучтенные в модели газодинамические процессы играют в формировании выбросов определяющую роль.

4. 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 инициирует резкое повышение давления газа и лавинообразное развитие этих трещин, что приводит к выбросу пород и газа. При этом объем выброшенной породы и газа определяется в большей степени размерами зон тектонического влияния нарушений, характеристик коллекторов газа и их положением относительно проводимых выработок, чем НДС вмещающего массива.

## **Глава 5. СПОСОБЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ПРОХОДКЕ ВЫРАБОТОК НА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ**

### **5.1 Проведение горных выработок в ГГМ рудника «Интернациональный» буровзрывным способом**

В период развертывания исследований проведение горных выработок на руднике «Интернациональный» осуществлялось буровзрывным способом. При приближении к отметке -790 м и ниже на автоуклоне и спиральном съезде были вскрыты и проявились в серии ГДЯ выбросоопасные породы – доломиты крупнозернистые, доломиты битуминизированные и доломиты брекчированные с коричневым галитовым цементом. Это потребовало корректировки способов управления устойчивостью выработок и методов прогнозирования зон, опасных по ГДЯ.

Центральной стала задача адаптации режимов проведения подготовительных выработок буровзрывным способом с учетом проявившихся ГГУ рудника и положения выбросоопасных слоев доломитов относительно контура выработки.

В целом буровзрывные работы (БВР) регламентируются Федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах», утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30 ноября 2017 г. № 518 (далее по тексту — Правил), более конкретно – пунктами 284 и 285.

На основании этих требований для условий рудника «Интернациональный» предложены и опробованы следующие мероприятия для предупреждения ГДЯ:

- постоянный мониторинг газовой обстановки в выработках;



– *применение специальных режимов проходки* с использованием способов предотвращения ГДЯ.

В процессе проведения выработок опробованы следующие *режимы*:

- проходка по слоям каменной соли;
- проходка по неопасным по ГДЯ вмещающим породам;
- вскрытие выбросоопасных пород (доломитов) буровзрывным способом;
- режим пересечения выбросоопасных пород (доломитов) буровзрывным способом;
- режим проходки механизированным (комбайновым) способом с передовым торпедированием.

С учетом требований «Правил...» в условиях повышенной выбросоопасности пород на руднике рационально и безопасно было проводить БВР в два этапа.

***Первый этап*** заключается в передовом торпедировании массива, под которым понимается взрывное воздействие на массив для снижения выбросоопасности. Достигается это за счет нарушения природной структуры газоносных слоев вмещающих пород энергией взрыва зарядов ВВ в шпурах или скважинах, пробуренных из забоя выработки, обеспечивающий изменение напряженно-деформированного состояния в призабойной зоне.

В результате происходит формирование в массиве областей повышенной трещиноватости с распространением газопроводящих трещин на обнаженную поверхность, обеспечивающих эффективную дегазацию вмещающих пород и предотвращение выбросов породы и газа.

Учет особенностей ГГУ и профиля выработки производится при составлении схемы комплекта шпуров для торпедирования, конструкции зарядов и ступеней замедления. Форма и размеры сечения выработки в значительной степени ограничивают число рациональных решений.

На руднике «Интернациональный» до начала исследований применялось адаптированное для его условий решение<sup>7</sup> [6], общая схема которого представлена на рисунке 5.1.

В зависимости от положения выбросоопасных слоев относительно сечения выработки и применяемого режима проходки часть шпуров из приведенного комплекта может (должно!?) быть исключено, что отражается в схемах особых режимов. Принципиальные решения представлены в таблице 5.1.

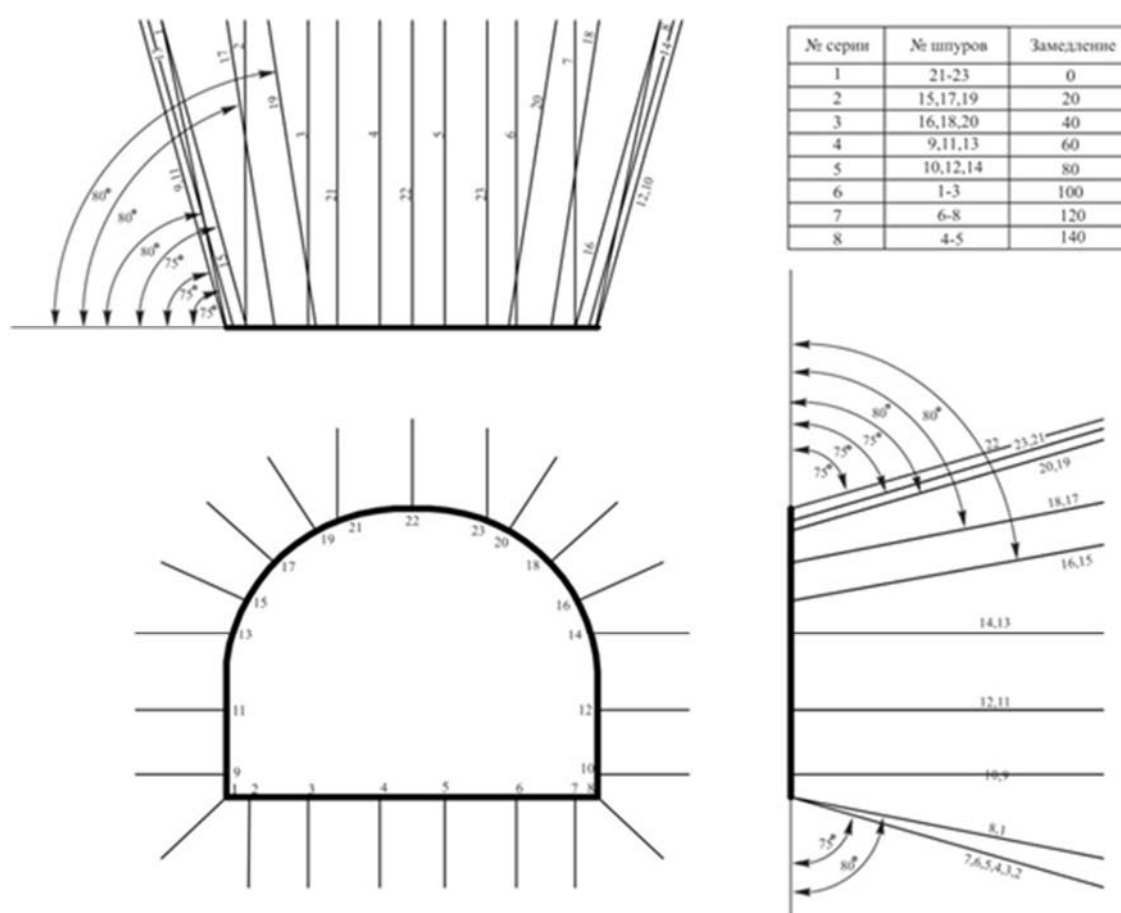
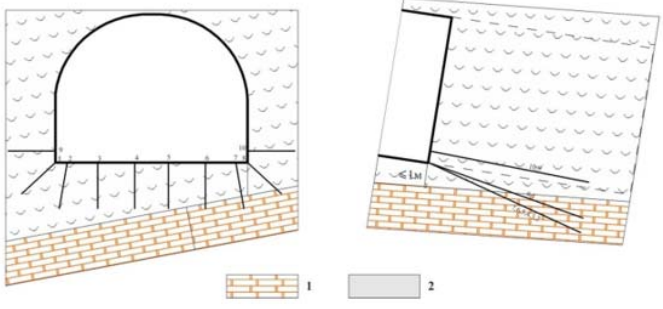
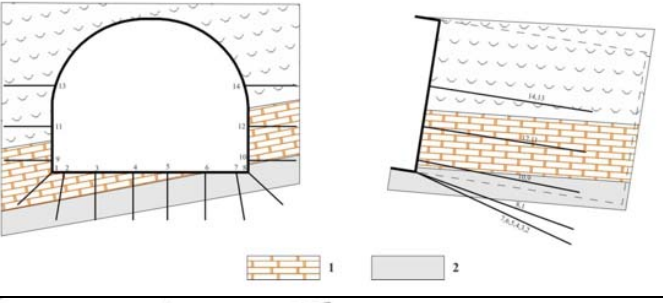
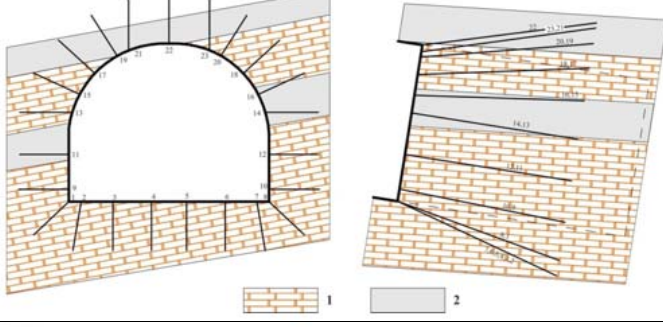
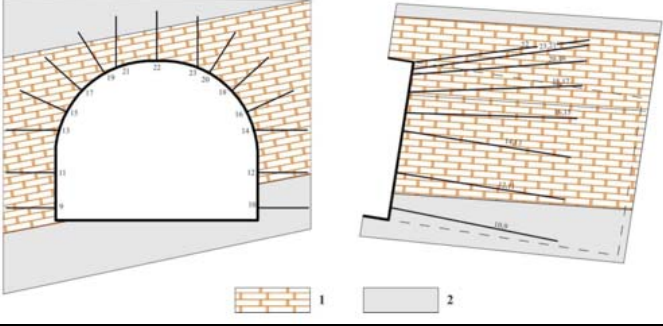


Рисунок 5.1 — Комплектование шпуров для торпедирования и ступени замедления

Таблица 5.1 – Схемы комплектования шпуров для особых режимов торпедирования слоев выбросоопасных пород

<sup>7</sup> ГИ УрО РАН. Отчет на оказание научно-технической услуги «Разработка рекомендаций по обеспечению безопасности работы горного персонала в зонах, опасных по выбросам породы и газа, подготовка предложений для корректировки «СпецМерИнтер» в части ведения горных работ в зонах, опасных по выбросам породы и газа, составление заключительного отчёта о НИР. (Заключительный).» Пермь: б.н., 2019.

№	Режим	Схема
1	Вскрытие выбросоопасных пород в почве выработки	
2	Пересечение выработкой слоев выбросоопасных пород в почве и части сечения выработки	
3	Пересечение выработкой слоев выбросоопасных пород в почве, проектном сечении выработки и кровле	
4	Пересечения выработкой слоев выбросоопасных пород в проектном сечении выработки и в кровле	

После выбора схемы комплектования шпуров по текущему режиму проведения выработки, эффективность торпедирования полностью определяется конструкцией заряда и типом ВВ.

Т.к. цель торпедирования – создание развитой перекрывающейся системы трещин в массиве по направлению продвижения выработки, то мощности заряда и скорости ударной волны должно быть достаточно, чтобы гарантировано разрушить породу между скважинами по всей их длине, но без передробления. Это минимизирует объем буровых работ, и положительно сказывается на

трудоемкости БВР и скорости продвижения забоя. При этом должна быть соблюдена безопасная длина забойки, чтобы исключить отколы и развязывание выброса.

Минимальная длина забойки регламентируется требованиями «Правил...» для различных ГГУ. Для условий рудника «Интернациональный» минимальная длина забойки по ГГУ составляет 0,8 м. Но после проведения первого цикла торпедирования порода далее по направлению проведения выработки становится ослабленной, поэтому для обеспечения безопасности требуется увеличение длины забойки даже при меньшем заряде.

Натурные наблюдения и анализ отчетов по случаям ГДЯ, зарегистрированным ранее, было установлено, что размер полости выброса на забое и на боках, как правило, не превышают 2 м. Было выдвинуто предположение, что это безопасная толщина ослабленной породы, прочность которой в текущих ГГУ не может преодолеть давление газов в трещинах. Поэтому для последующих циклов торпедирования длина забойки была установлена в 2 м.

Также были разработаны модели для определения эффективных и безопасных параметров скважин и зарядов. Соответствующие исследования приведены далее в п. 5.3.

Таким образом, по совокупности условий с учетом технического обеспечения рудника «Интернациональный» была предложена конструкция, представленная на рисунке 5.2.

После торпедирования выбросоопасного слоя осуществляется **второй этап** – отбойка пород буровзрывным способом. На этом этапе для снижения интенсивности ГДЯ используется пространственное расположение шпуров и особый порядок взрывания зарядов в шпурах.

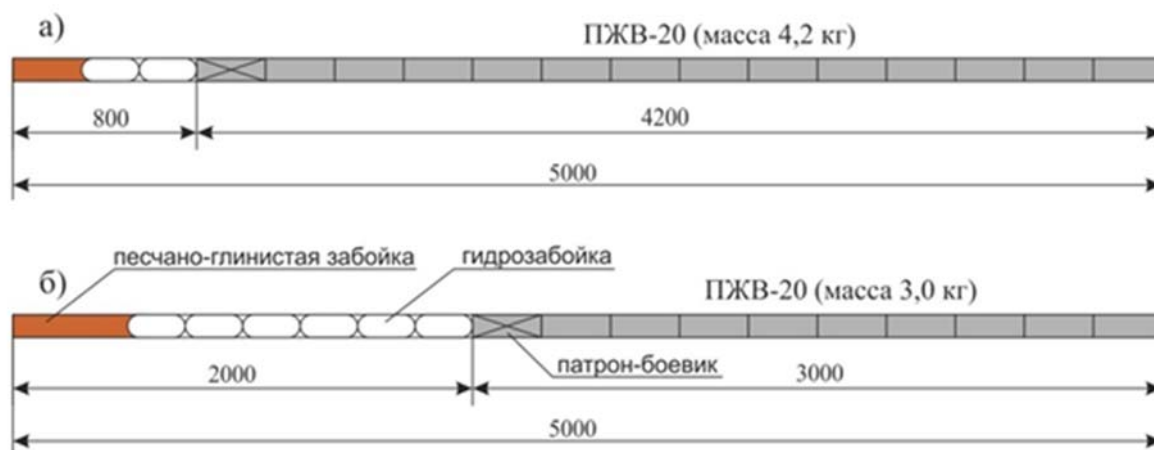


Рисунок 5.2 — Конструкция заряда: а) при первом цикле торпедирования;  
б) при последующих циклах торпедирования

В основе подхода к снижению выбросоопасности на этом этапе лежит представление о том, что объем выброса газа и породы при взрывной отбойке определяется объемом и порядком разрушения фрагментов массива. Таким образом, адаптация параметров БВР под конкретные условия ведения работ может быть реализована путем пространственной оптимизации размещения зарядов и ступеней замедления [44, 47].

В ходе опытно-промышленных работ с этой идеей были отработаны и показали свою эффективность следующие схемы комплектования шпуров. На рисунке 5.3 представлена схема комплектов шпуров для взрывной отбойки породы при расположении выбросоопасного слоя в нижней части сечения выработки (а) или в верхней части забоя (б) по всей ширине выработки, опробованная в условиях рудника «Интернациональный».

В первом случае предлагаемая схема работает следующим образом. При взрывании шпуровых зарядов внутреннего и внешнего клина происходит обнажение выбросоопасных пород на площади, достаточной для развития инициированного взрывным импульсом выброса породы и газа – газопородный поток устремляется в выработку. Затем взрываются отбойные и оконтуривающие шпуровые заряды и отбитой породой «задавливается» в начальной стадии развития газопородный поток выброса.

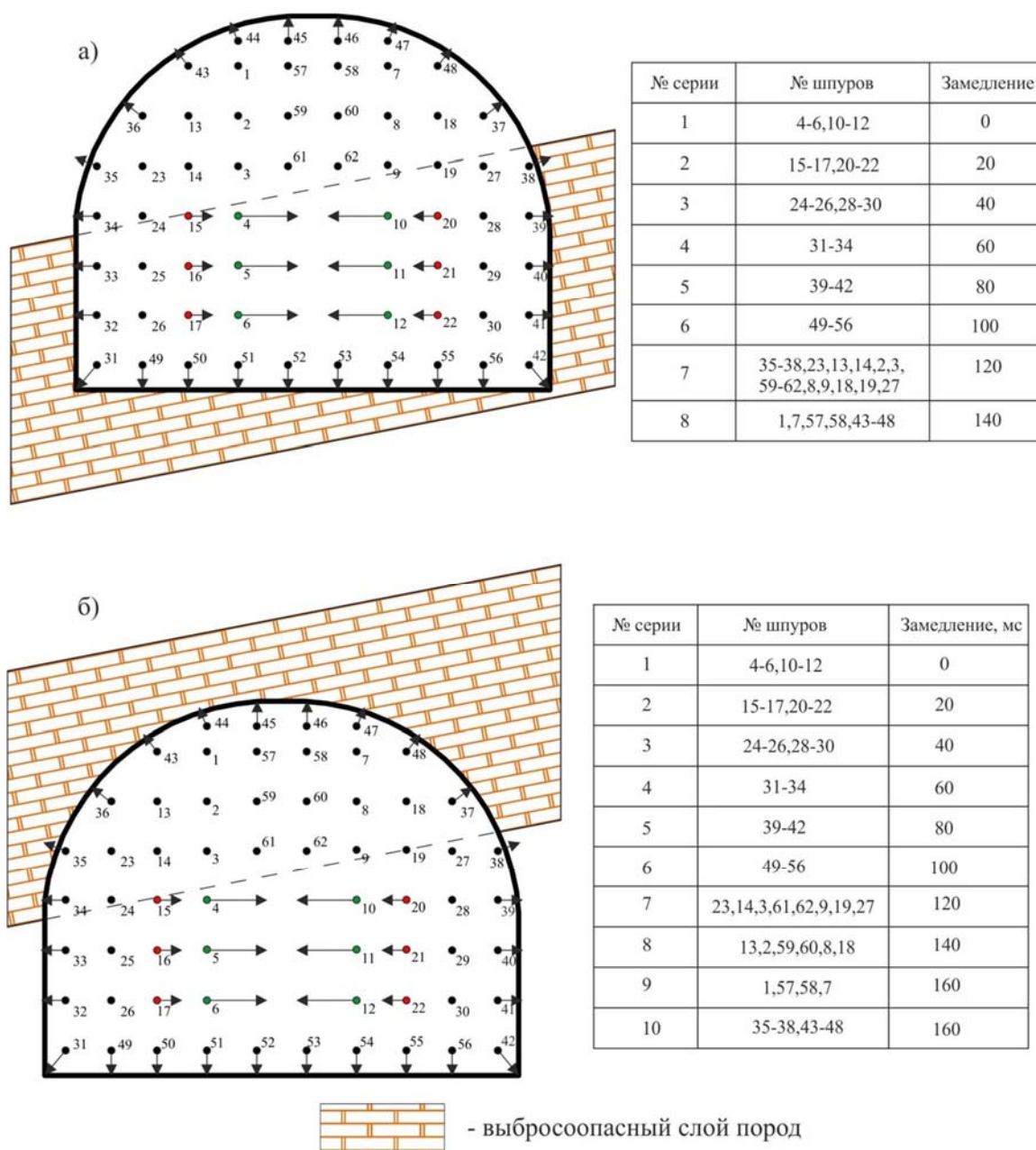


Рисунок 5.3 — Схемы комплектов шпуров для управления интенсивностью выбросов породы и газа при взрывной отбойке:

- а — слой выбросоопасных пород расположен в нижней части забоя выработки;  
 б — слой выбросоопасных пород расположен в верхней части забоя выработки

Во втором случае предлагаемая схема работает несколько иначе. При взрывании шпуровых зарядов внутреннего и внешнего клина, а также отбойных и оконтуривающих шпуров в нижнем невыбросоопасном слое пород происходит обнажение подошвы выбросоопасного слоя на значительной площади, достаточной для развития инициированного взрывным импульсом выброса

породы и газа — газопородный поток устремляется преимущественно в направлении почвы выработки — сверху вниз. При взрывании отбойных и оконтуривающих шпуровых зарядов в выбросоопасном слое происходит его разрыхление, увеличивается объем разрушенной породы и может произойти забучивание отбитой и разрушенной породой газопородного потока выброса. В этом случае для прекращения неуправляемого распространения волны дробления в массив используются силы, собственно порожденные выбросом породы и газа.

Схемы расположения комплектов шпуров приведены на рисунке 5.4: (а) — при залегании выбросоопасных слоев в нижней и верхней частях забоя; (б) — при нахождении опасного слоя в средней части по всей ширине выработки.

При залегании выбросоопасных пачек у кровли и почвы забоя (рис. 5.4-а) целесообразно сначала производить отбойку среднего невыбросоопасного слоя пород. В этом случае при обнажении почвы и кровли выбросоопасных слоев создаются условия для развития выбросов породы и газа из верхнего выбросоопасного слоя вниз по направлению почвы, а из нижнего выбросоопасного слоя вверх по направлению к кровле, т. е. в этом случае два газопородных потока выбросов начнут двигаться преимущественно навстречу друг другу, что позволит снизить интенсивность выбросов за счет возможного их самозабучивания.

Во-втором варианте расположения выбросоопасного слоя пород в центральной части забоя по всей ширине выработки (рис. 5.4-б) также целесообразно первоначально производить отбойку среднего выбросоопасного слоя. В этом случае при обнажении выбросоопасных пород выброс начнет развиваться из центральной части забоя и газопородный поток устремится из центральной части забоя в выработку.



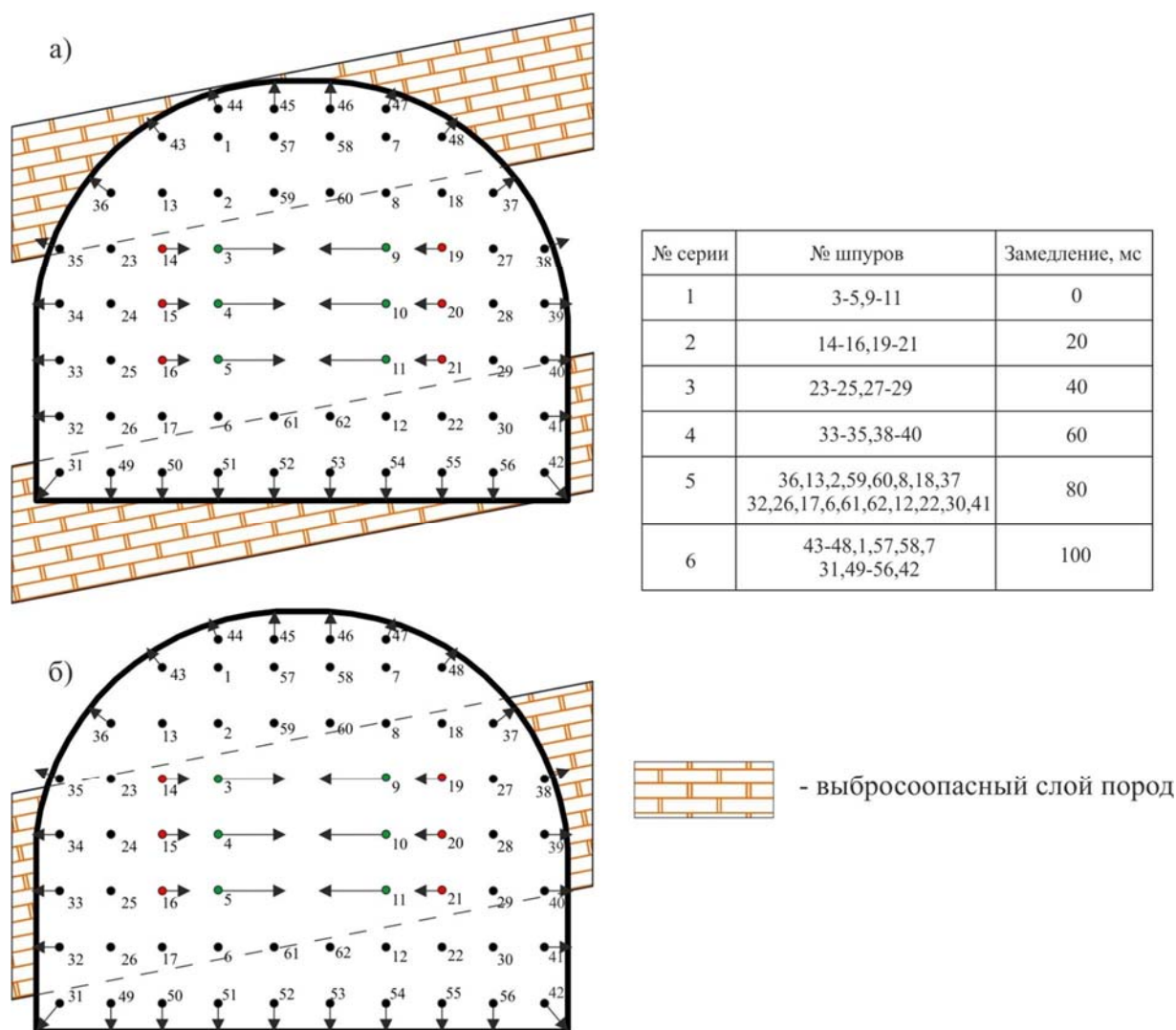


Рисунок 5.4 — Схемы комплектов шпуров для управления интенсивностью выбросов породы и газа при взрывной отбойке:

а — в сечении выработки слои выбросоопасных пород расположены в нижней и в верхней частях забоя; б — слой выбросоопасных пород расположен в центральной части забоя выработки

При последующей отбойке невыбросоопасных слоев в верхней и нижней частях забоя произойдет взрывное воздействие на газопородный поток со стороны кровли и почвы выработки, сечение которого может быть перекрыто отбитой породой, что в конечном итоге приводит к затуханию процесса послойного отрыва в массиве из-за самоподбучивания, т. к. любое разрушение может только до тех пор, пока возможно увеличение объема.



## **5.2 Обоснование параметров БВР при проведении прямолинейных участков выработок**

По аналогии со способами низконапорного увлажнения и поинтервального гидроразрыва угольных пластов, а также проведением передовой выработки малого сечения по выбросоопасным песчаникам идея заключается в создании по трассе проведения выработки протяженной зоны трещиноватости для заблаговременной разгрузки коллекторов газа и дегазации массива с целью снижения его выбросоопасности.

Для условий проведения торпедирования массива доломитов при проведении подготовительных выработок на руднике «Интернациональный» установлено воздействие взрыва на протяженность зон деформаций. В результате взрывного воздействия выделяют три области [232]:

1. Зона дезинтеграции (область полного разрушения пород).
2. Зона наведенной трещиноватости (область частичной нарушенности массива).
3. Микротрещиноватости.

1 зона — не оценивается, т. к. представлена полностью разрушенными горными породами.

2 зона — является ключевым объектом исследования; массив характеризуется интенсивной взрывной трещиноватостью и низкой устойчивостью.

3 зона — не рассматривается, так как микротрещины не снижают исходные показатели нарушенности массива [232].

Оценка воздействия взрывных работ выполнялась с помощью специализированного ПО ПРЗВВ (программа расчета зон влияния взрыва). Методика вычислений базируется на анализе скоростей сейсмических колебаний, критические значения которых определяют границы нарушения сплошности и дезинтеграции массива. В качестве исходных данных в программный комплекс

вносят параметры БВР, характеристики скважинных зарядов и физико-механические показатели доломитов и др [223].

В расчет закладывались следующие параметры скважин и зарядов согласно применяемым на руднике типоразмерам бурового оборудования:

- длина скважин 30 и 20 м;
- диаметр скважины 76 и 105 мм;
- диаметр заряда ВВ 60 и 90 мм;
- длина забойки 7 м для скважин 30 м и 5 м для скважин 20 м;
- тип ВВ — аммонит № 6ЖВ и др. (таблицы 41 и 42).

На рисунках 5.5 показаны расчеты глубины формирования зоны 2 от действия взрыва в доломитах с вариацией физико-механических свойств при различных параметрах скважины и заряда ВВ.

Исходя из результатов расчетов, выбран диаметр скважин для передового скважинного торпедирования, составляющий 105 мм. Позднее, по программе опытно-промышленных испытаний передового торпедирования в слоевом заезде № 28 эксплуатационного блока № 11 рудника «Интернациональный» с учетом конструкции скважинного заряда, проектный диаметр скважин был увеличен до 110 мм.

Для выполнения передового скважинного торпедирования была принята как наиболее целесообразная параллельная схема бурения скважин. По данной схеме скважины бурились параллельно оси выработки — две скважины передового торпедирования и одна скважина компенсационная (рис. 5.13).

В таблице 5.2 приведены основные характеристики БВР. Заряд представлял собой патронированные ВВ из аммонита №6ЖВ с диаметром патронов 32 мм и массой 0,2 кг. Заряд формируется из нескольких пучков патронов. Общее количество пучков в скважине 25 штук, из них два боевика, состоящих из семи патронов с двумя электродетонаторами.

Общий вес заряда в скважине составляет 35 кг. Для надежной передачи детонации заряда дополнительно применяется детонирующий шнур ДШЭ-12. Конструкция заряда и патрона боевика представлена на рисунках 5.14-5.15.

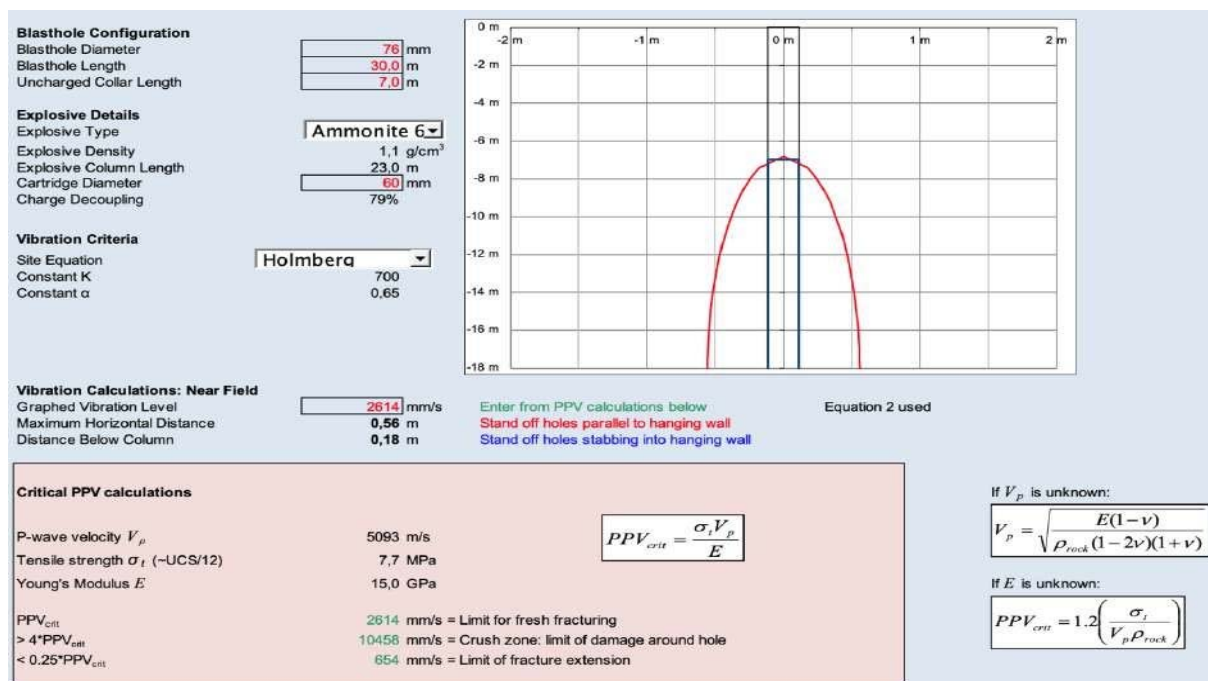


Рисунок 5.5 — Зона 2: скорость колебания 2614 мм/с, глубина зоны 0,56 м, в торцах скважинного заряда 0,18 м.

Длина скважины 30 м; диаметр скважины 76 мм; диаметр заряда 60 мм; длина забойки 7 м; скорость продольной волны,  $V_p = 5093$  м/с; прочность на растяжение,  $\sigma_p = 7,7$  МПа; модуль упругости,  $E_y = 15$  ГПа

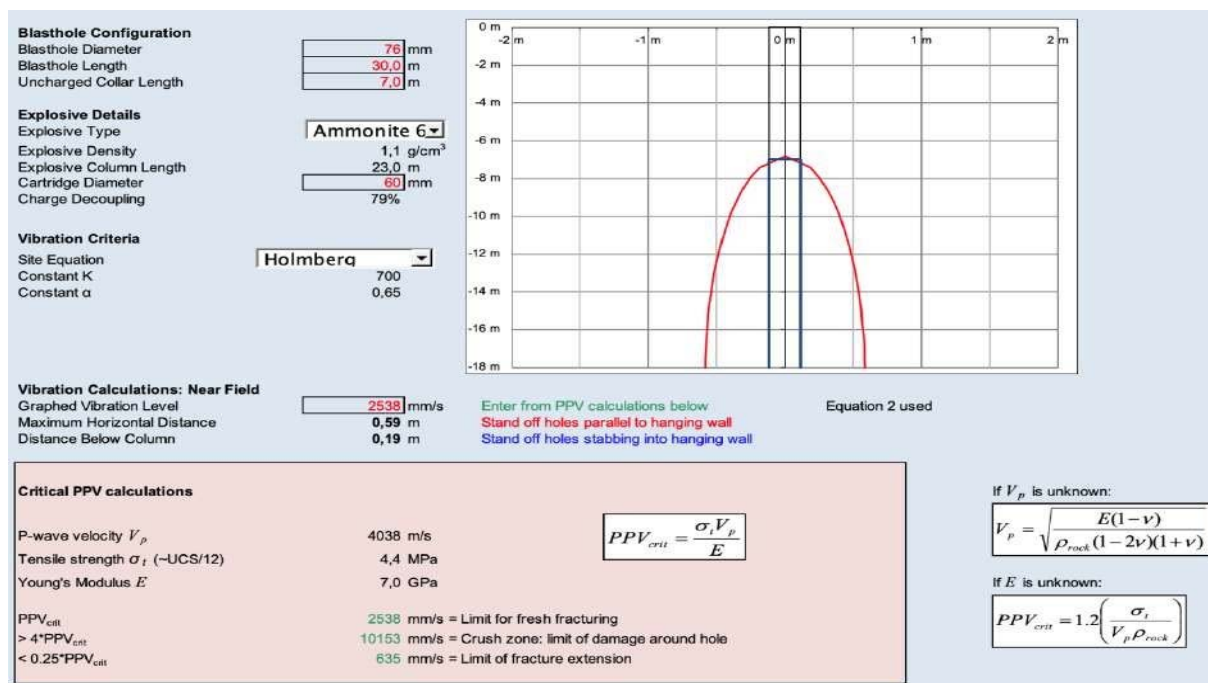


Рисунок 5.6 — Зона 2: скорость колебания 2538 мм/с; глубина зоны 0,59 м; в торцах скважинного заряда 0,19 м.

Длина скважины 30 м; диаметр скважины 76 мм; диаметр заряда 60 мм; длина забойки 7 м; скорость продольной волны,  $V_p = 4038$  м/с; прочность на растяжение,  $\sigma_p = 4,4$  МПа; модуль упругости,  $E_y = 7$  ГПа

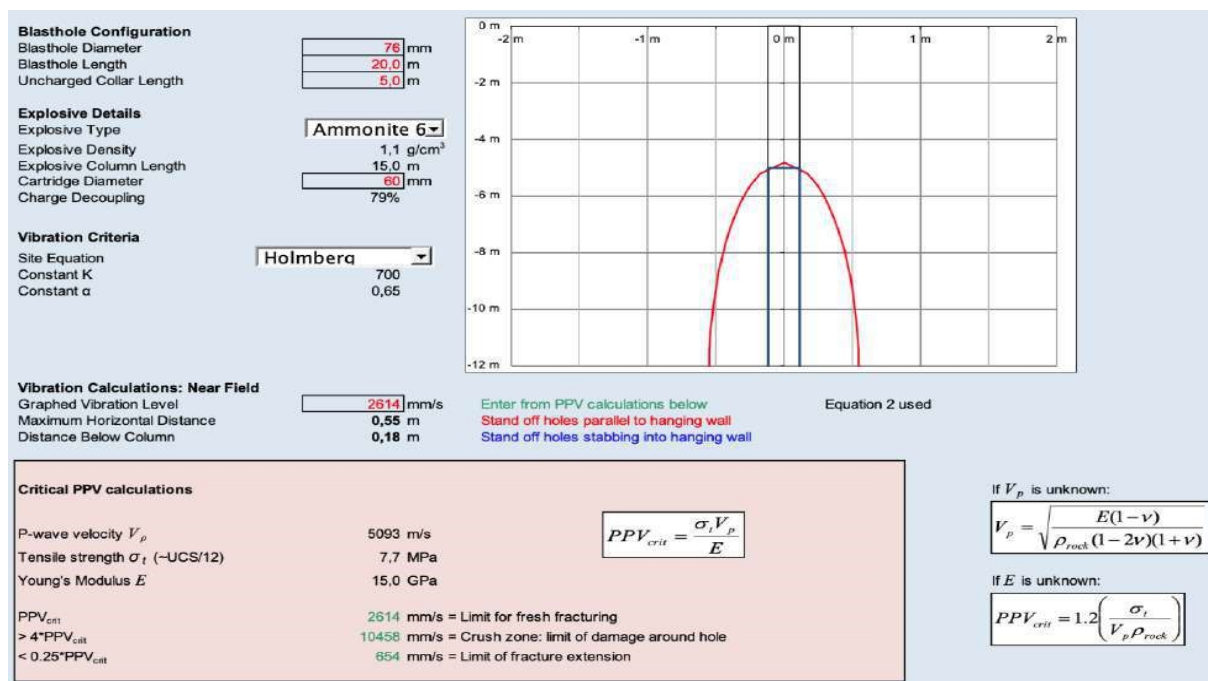


Рисунок 5.7 — Зона 2: скорость колебания 2614 мм/с; глубина зоны 0,55 м; в торцах скважинного заряда 0,18 м.

Длина скважины 20 м; диаметр скважины 76 мм; диаметр заряда 60 мм; длина забойки 5 м; скорость продольной волны,  $V_p = 5093$  м/с; прочность на растяжение,  $\sigma_p = 7,7$  МПа; модуль упругости,  $E_y = 15$  ГПа

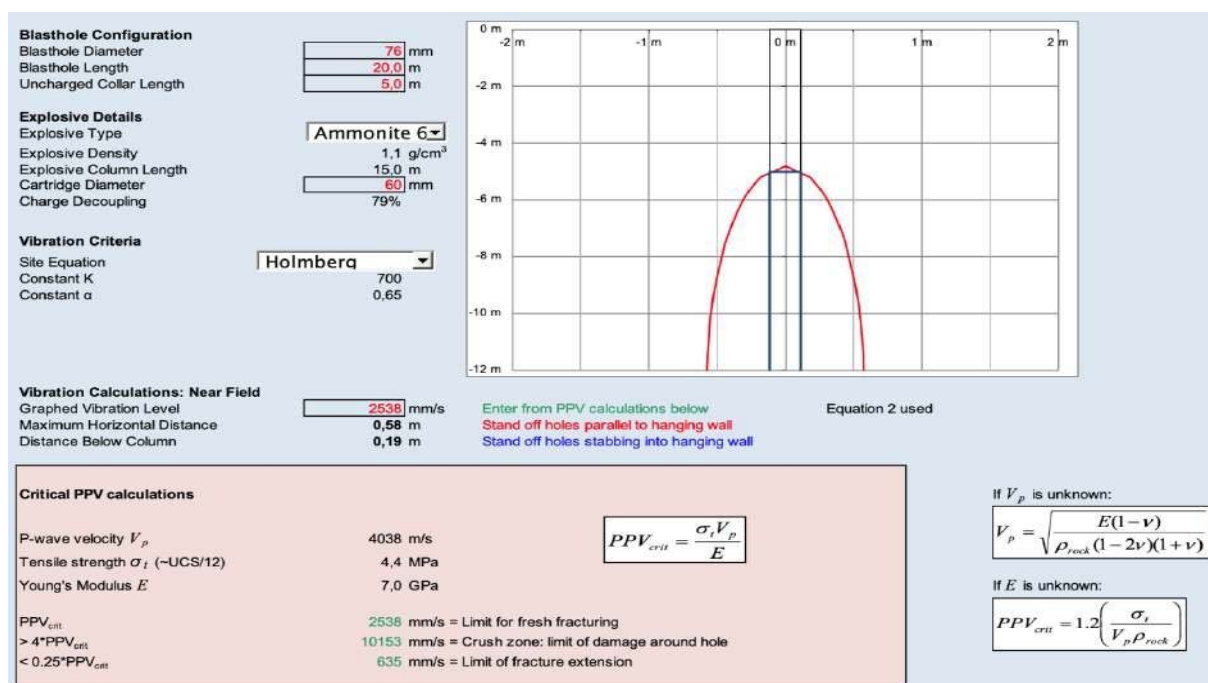


Рисунок 5.8 — Зона 2: скорость колебания 2538 мм/с; глубина зоны 0,58 м; в торцах скважинного заряда — 0,19 м)

Длина скважины 20 м; диаметр 76 мм; диаметр заряда 60 мм; длина забойки 5 м; скорость продольной волны,  $V_p = 4038$  м/с; прочность на растяжение,  $\sigma_p = 4,4$  МПа; модуль упругости,  $E_y = 7$  ГПа

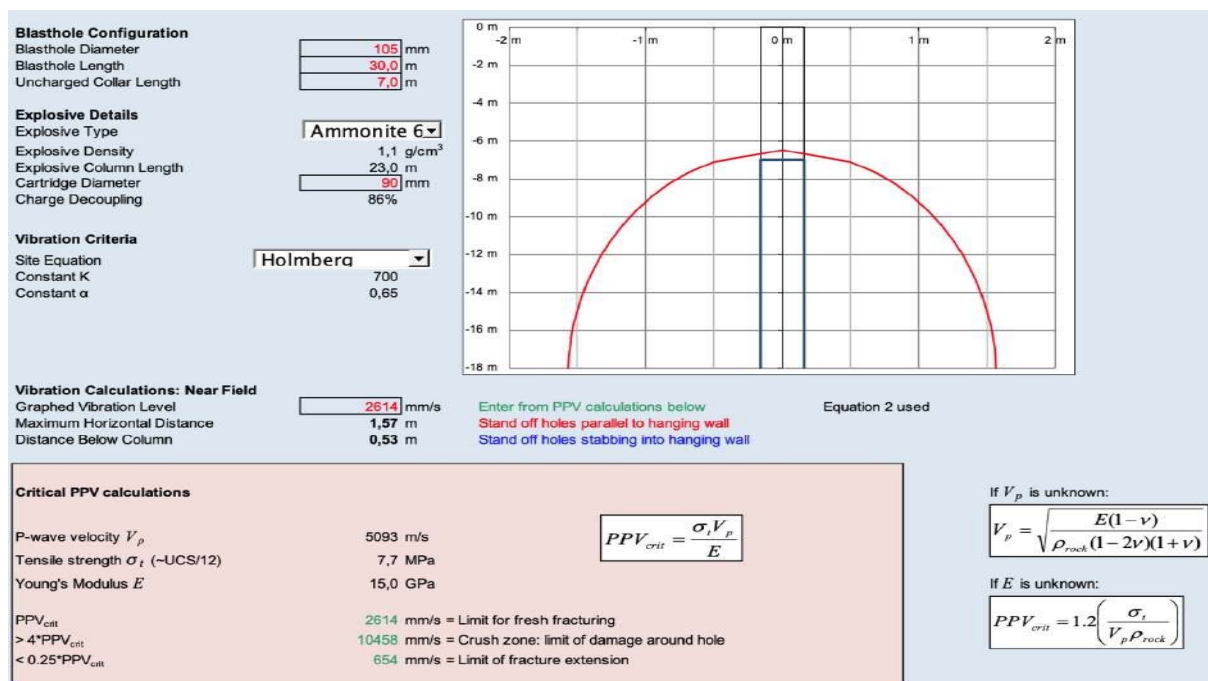


Рисунок 5.9 — Зона 2: скорость колебания 2614 мм/с; глубина зоны 1,57 м; в торцах скважинного заряда 0,53 м.

Длина скважины 30 м; диаметр скважины 105 мм; диаметр заряда 90 мм; длина забойки 7 м; скорость продольной волны,  $V_p = 5093$  м/с; прочность на растяжение,  $\sigma_p = 7,7$  МПа; модуль упругости,  $E_y = 15$  ГПа

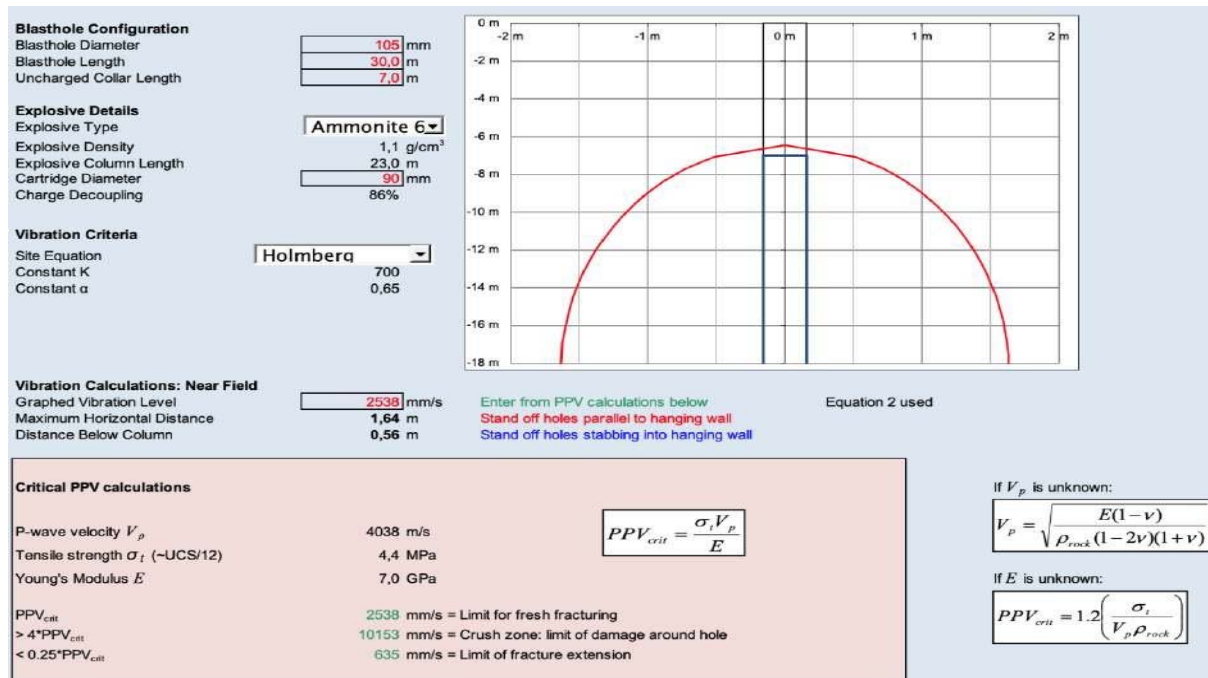


Рисунок 5.10 — Зона 2: скорость колебания 2538 мм/с; глубина зоны 1,64 м; в торцах скважинного заряда 0,56 м.

Длина скважины 30 м; диаметр скважины 105 мм; диаметр заряда 90 мм; длина забойки 7 м; скорость продольной волны,  $V_p = 5093$  м/с; прочность на растяжение,  $\sigma_p = 7,7$  МПа; модуль упругости,  $E_y = 15$  ГПа



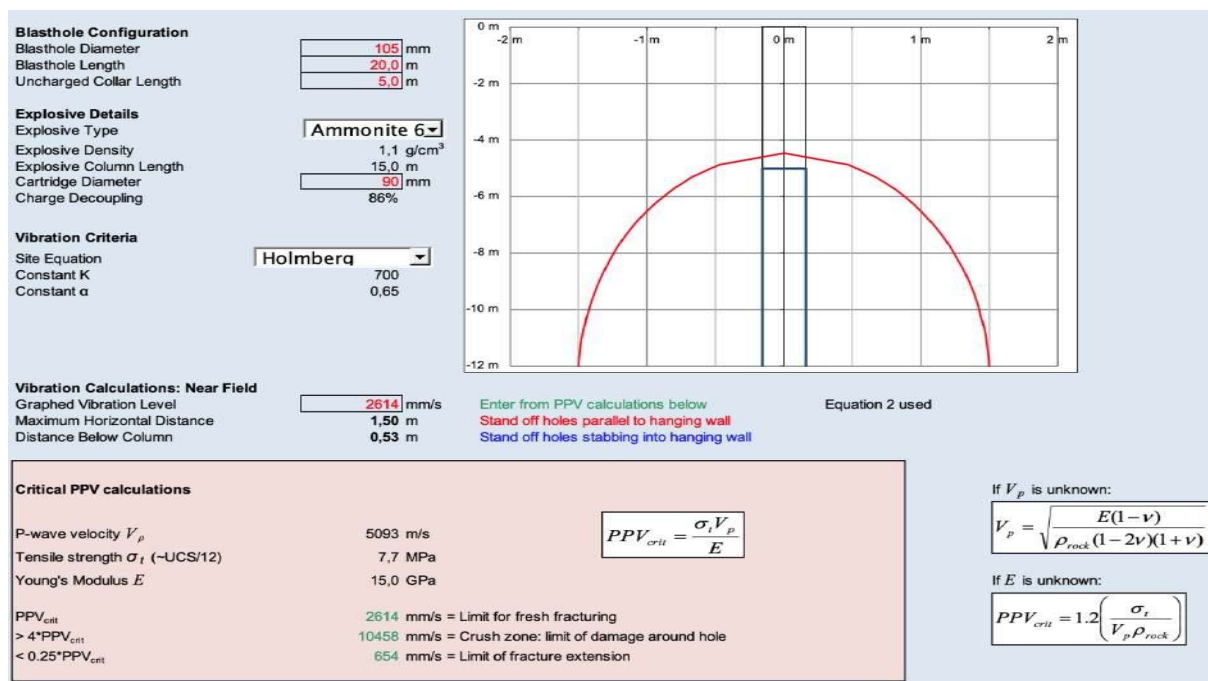


Рисунок 5.11 — Зона 2: скорость колебания 2614 мм/с; глубина зоны 1,50 м;  
 в торцах скважинного заряда 0,53 м;  
 Длина скважины 20 м; диаметр скважины 105 мм; диаметр заряда 90 мм;  
 длина забойки 5 м; скорость продольной волны,  $V_p = 5093$  м/с;  
 прочность на растяжение,  $\sigma_p = 7,7$  МПа; модуль упругости,  $E_y = 15$  ГПа

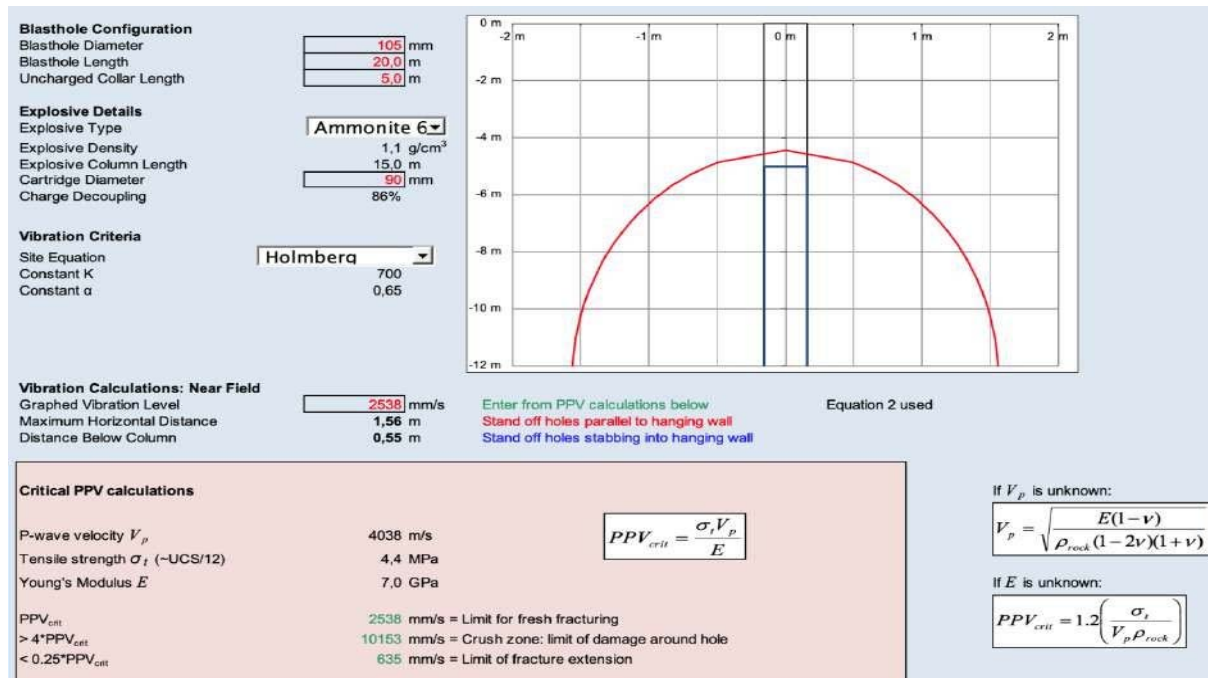
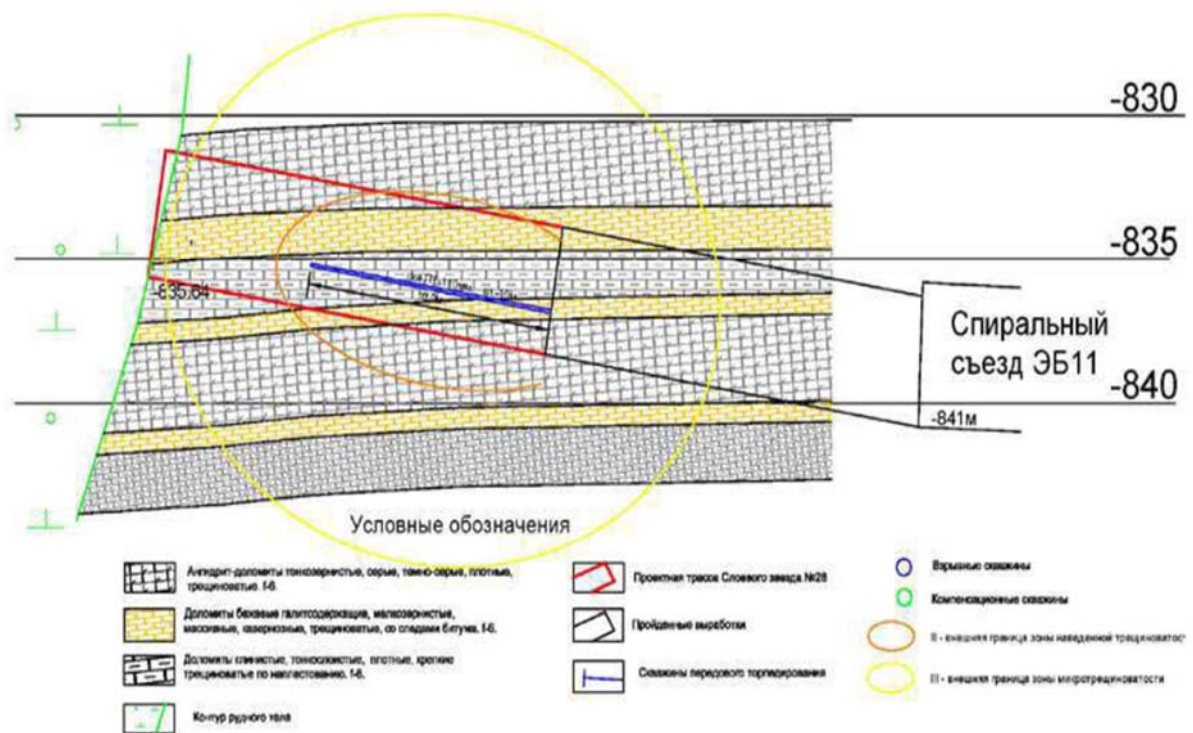


Рисунок 5.12 — Зона 2: скорость колебания 2538 мм/с; глубина зоны 1,56 м;  
 в торцах скважинного заряда 0,55 м;  
 Длина скважины 20 м; диаметр скважины 105 мм; диаметр заряда 90 мм;  
 длина забойки 5 м; скорость продольной волны,  $V_p = 4038$  м/с;  
 прочность на растяжение,  $\sigma_p = 4,4$  МПа; модуль упругости,  $E_y = 7$  ГПа



## Забой слоевого заезда №28 ЭБ11

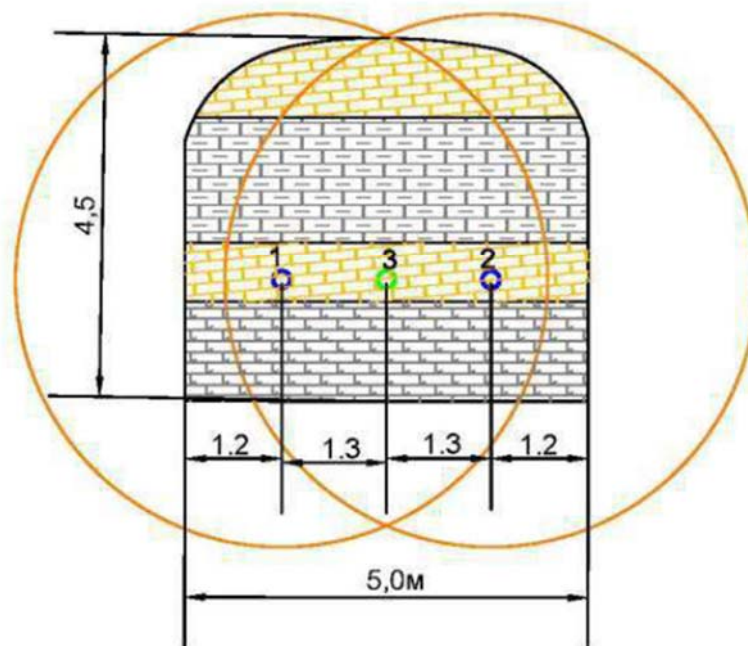
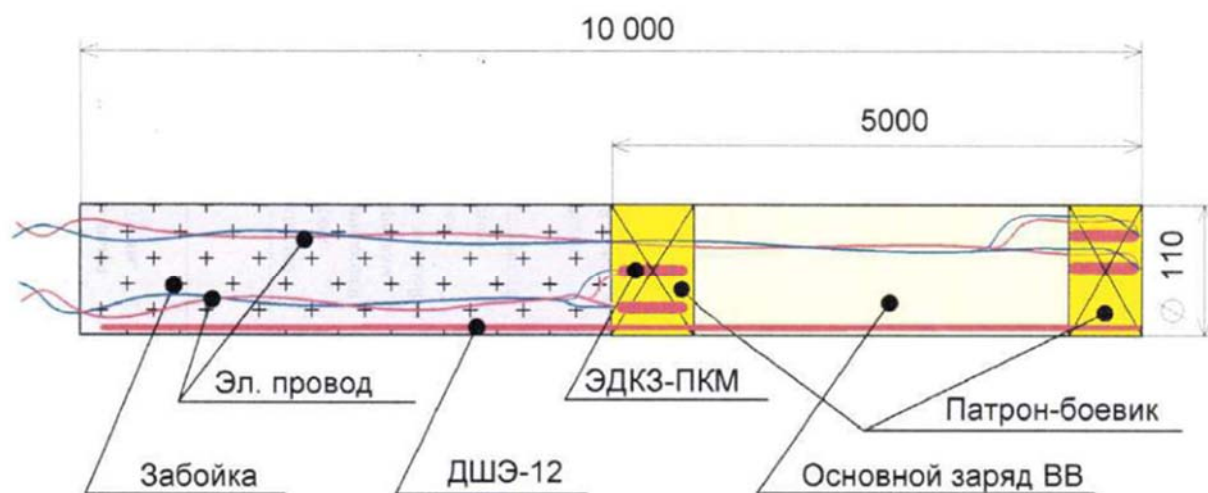


Рисунок 5.13 — Схема расположения скважин передового торпедирования по слоевому заезду № 28

Таблица 5.2 — Основные параметры БВР

Наименование показателей	Единица измерения	Количество
Наименование применяемых ВМ	Аммонит патронированный № 6-ЖВ, детонирующий шнур ДШЭ-12, электродетонаторы с нормальной чувствительностью ЭДКЗ-0П	
Данные о способе заряжания	Вручную	
Материал забойки	Забойка минеральная уплотняющаяся или ампулы минеральные ускоренные АМУ 38/350	
Длина забойки	Не менее 50 % от длины скважины, м	5
Диаметр скважин	мм	110
Число скважин на цикл: 3 (две скважины передового торпедирования и одна скважина локального прогноза и дегазации)	Шт.	3
Глубина скважин	м	10
Общая длина скважин на цикл	м	30
КИШ		0
Заряд на скважину	кг	35
Расход ВВ на цикл	кг	70
Количество взорванной горной массы за цикл	м <sup>3</sup>	0
Способ инициирования зарядов	Электрический	
Схема соединения взрывной сети	Последовательно-параллельного соединения	
Источник электрического тока — импульсная станция	Глобал ВС-6	1





1. Глубина скважины - 10 м, D - 110 мм.
2. Длина заряда в скважине 5 м.
3. Длина забойки 5 м.
4. Заряд формируется из пучков патронов аммонита 6ЖВ 32 мм. Пучек состоит из 7 патронов связанных скотчем и составляет 1,4 кг.
5. Общее количество пучков в скважине 25 штук, из них 2 патрона-боевика.
6. Общий вес заряда в скважине составляет 35 кг.
7. Для надежности детонации заряда дополнительно применяется шнур ДШЭ-12.

Рисунок 5.14 — Конструкция заряда

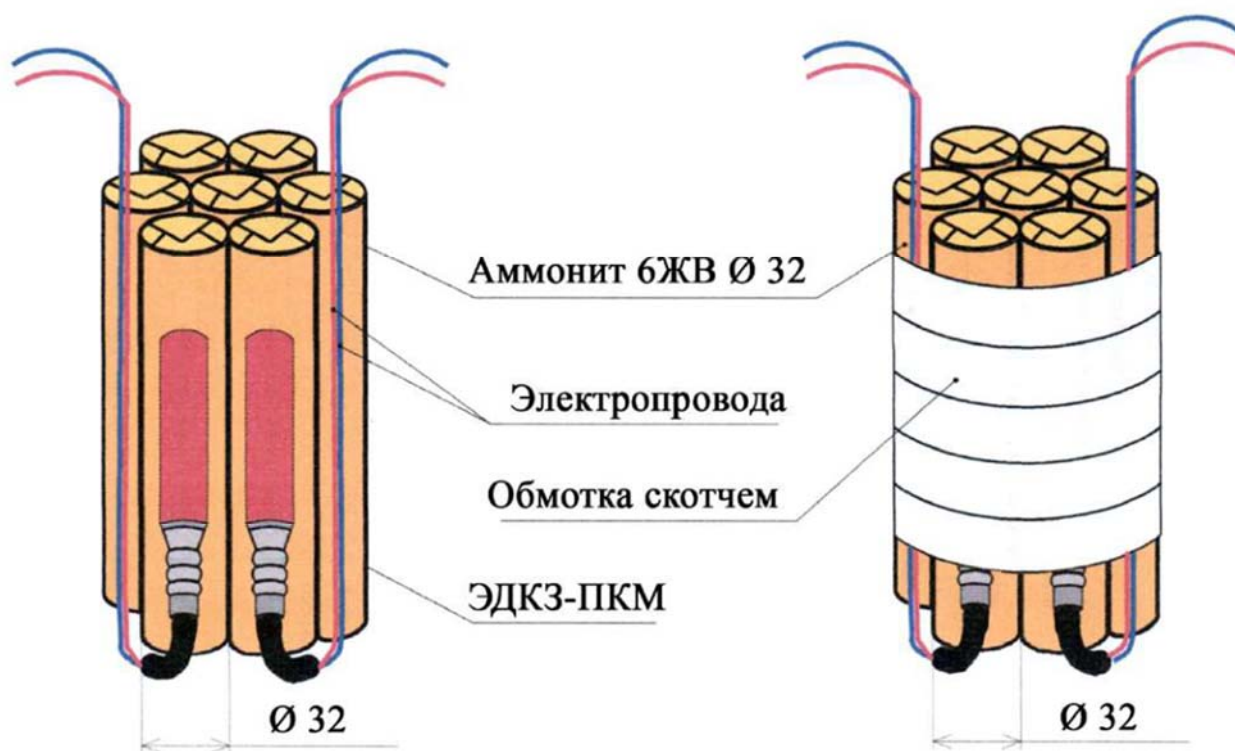


Рисунок 5.15 — Конструкция патрона-боевика

Перед заряджанием выполнялась очистка от буровой мелочи и шаблонирование боевых скважин. Очистка скважин производится досылкой в скважину сегмента сечением не менее половины диаметра пучка скважинного заряда. Шаблонирование осуществлять досылкой фальш-патрона такого же диаметра, как пучок боевых патронов.

В качестве доставщика применялись забойники из материала, не дающего искр (титановые составные трубы). Заряджание скважин производилось вручную.

Схема расположения скважин передового торпедирования по слоевому заезду № 28 ЭБ № 11 представлена на рисунках 5.16 и 5.17. По данной схеме скважины бурились параллельно оси выработки в забое слоевого заезда № 28 блока 11 – две скважины передового торпедирования и одна скважина компенсационная.

При проведении слоевого заезда № 28 блока № 11 для оценки НДС массива и эффективности БВР по спиральному съезду (в основной части ОПИ, с 25 по 27 мая 2022 года) были проведены геофизические измерения методами ЕЭМИ и ВЭМИ.

Результаты зондирования по методу ВЭМИ, проведенного в слоевом заезде блока № 11, представлены на рисунках 5.18-5.20. Зондирование в выработке выполнялось поинтервально через 1 метр на глубину в массив на 15 метров. Пункты зондирования располагались друг от друга на расстоянии 5 метров. Минимальное расстояние от забоя выработки на момент измерения, после проведения передового торпедирования, составляло 13 м.

Как видно из графиков, состояние пород боков, кровли и почвы выработки вдоль профиля отличалось значительной неоднородностью.

Непосредственно у забоя слоевого заезда (замерная точка Т2) практически на всю глубину зондирования фиксировалась зона умеренной трещиноватости (зона разгрузки). На расстоянии в 5 и 10 метрах от забоя (точки Т0, Т1) в массиве отмечены и зоны трещиноватости, и зоны плотных структур.

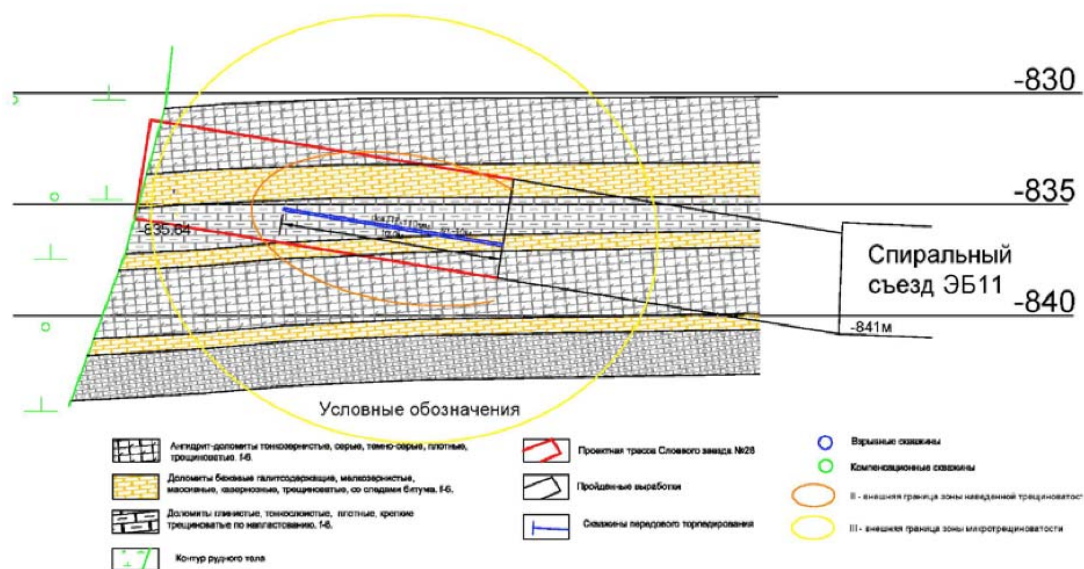


Рисунок 5.16 — Схема расположения скважин передового торпедирования по слоевому заезду № 28 ЭБ № 11

### Забой слоевого заезда №28 ЭБ11

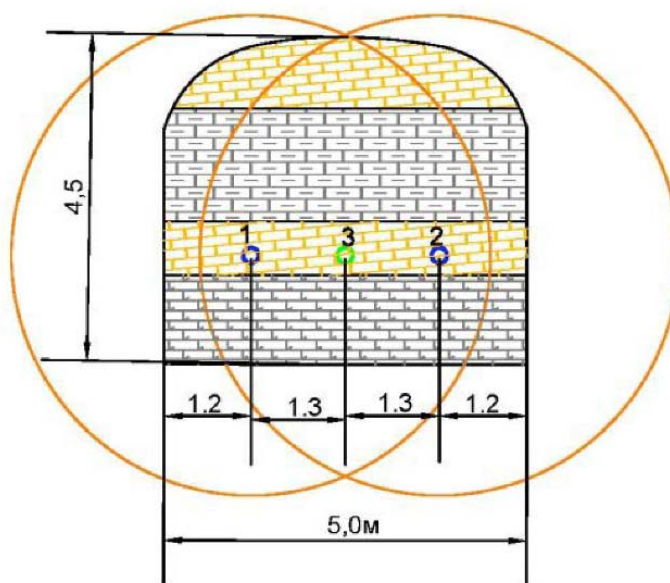


Рисунок 5.17 — Схема расположения скважин передового торпедирования в забое слоевого заезда № 28 ЭБ № 11

В точке ТЗ зона плотных структур массива, трещиноватость зафиксирована только в приконтурной зоне боков выработки на глубину до 1 метра. Важно отметить, что зон опасных максимальных нагрузок по всей трассе зондирования не выявлено.

Анализ геомеханического состояния пород кровли и почвы показал, что зона максимального расслоения массива находится на участке проведения замеров в точке ТЗ. В точках Т0 и Т1 отмечена умеренная трещиноватость, сменяющаяся вглубь массива плотными структурами. Напротив, в пункте зондирования Т2 в непосредственной близости от забоя выработки, в кровле зафиксированы плотные структуры, которые по мере удаления от бока выработки сменялись трещиноватыми прослойками.

Замеры методом ЕЭМИ в забое спирального съезда проводились в два этапа: после проведения передового торпедирования и после взрывной отбойки породы.

Замеры проводились в забое спирального съезда (далее — СС) по варианту контурного профилирования. При различной ориентации антенны непосредственно по контуру выработки фиксировались амплитуды ЕЭМИ и соответствующие им участки повышенных значений. Области повышенных значений можно было определить как по длине выработки, так и по высоте.

На рисунках 5.21-5.24 представлены данные по распределению амплитуды ЕЭМИ по СС по контуру и по профилю. Замеры были проведены непосредственно в забое выработки.

Полученные значения параметров ЕЭМИ показали, что после выполнения передового торпедирования массива (рис. 5.21) бока выработки разгрузились, с соответствующим развитием трещиноватости в массиве.

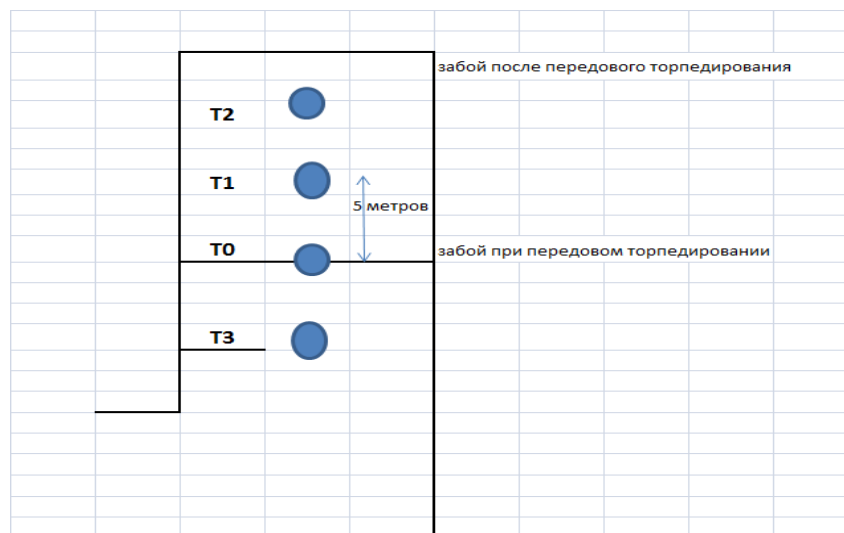


Рисунок 5.18 — Схема проведения измерений по слоевому заезду блока № 11

Слоевой заезд блок №11									
левый бок					правый бок				
Глубина зондирования, м	15	0,24		0,28	0,24		0,28		
	14	0,25	0,18	0,32	0,25	0,17	0,33		
	13	0,24	0,47	0,25	0,38	0,24	0,45	0,26	0,37
	12	0,25	0,41	0,25	0,38	0,25	0,42	0,25	0,38
	11	0,23	0,32	0,22	0,43	0,24	0,35	0,22	0,42
	10	0,24	0,27	0,24	0,49	0,25	0,28	0,25	0,48
	9	0,3	0,24	0,27	0,54	0,22	0,26	0,28	0,53
	8	0,24	0,23	0,25	0,49	0,24	0,24	0,25	0,48
	7	0,26	0,25	0,31	0,41	0,26	0,25	0,31	0,4
	6	0,24	0,26	0,37	0,44	0,25	0,26	0,37	0,44
	5	0,28	0,32	0,45	0,43	0,29	0,32	0,46	0,45
	4	0,34	0,33	0,5	0,39	0,33	0,32	0,51	0,4
	3	0,49	0,43	0,55	0,51	0,51	0,53	0,55	0,54
	2	0,53	0,56	0,61	0,69	0,55	0,55	0,62	0,71
	1	0,87	1	1,29	1,2	0,87	1	0,99	1,01
0	-5	0	5	10	-5	0	5	10	Расстояние от
	*4	*1	*2	*3	*8	*5	*6	*7	места проведения передового торпедирования, м
	T3	T0	T1	T2	T3	T0	T1	T2	Номер замера

Рисунок 5.19 — Результаты наблюдений аппаратурой ANGEL-M с функцией АЭШ слоевого заезда блока № 11. Оценка напряженного состояния боков выработки по значениям показателя напряженности F

		Кровля				Почва							
Глубина зондирования, м	15	4,14			4,23	2,64			3,44				
	14	4		1,6	1,66	3,4	1,24	1,24	1,55				
	13	3,42	1,6	2,24	3,71	2,71	2,53	2,53	3,12				
	12	3,47	1,18	1,91	2,32	2,58	1,91	1,91	2,11				
	11	4,18	1,55	2,71	3,61	2,02	2,3	2,3	2,02				
	10	4,02	1,58	2,2	1,87	2,63	2,75	2,75	1,78				
	9	4,11	2,03	1,63	1,93	3	2,29	2,29	1,62				
	8	3,56	2,27	2,07	1,35	2,81	2,07	2,07	1,16				
	7	2,76	3,33	1,7	0,98	2,05	1,64	1,64	0,86				
	6	1,98	2,41	1,21	0,81	1,68	1,61	1,61	0,78				
	5	1,77	2,06	1,33	0,72	1,64	1,32	1,32	0,67				
	4	1,81	1,66	1,13	0,62	1,55	1,11	1,11	0,56				
	3	1,62	1,4	0,94	0,71	1,46	0,94	0,94	0,64				
	2	1,31	1,13	0,92	0,86	1,05	0,91	0,91	0,77				
	1	1,05	1,01	1,01	1,09	0,92	1	1	1	Расстояние от			
	0	-5	0	5	10	-5	0	5	10	места проведения передового торпедирования, м			
		*4	*1	*2	*3	*4	*1	*6	*3	Номер замера			
		T3	T0	T1	T2	T3	T0	T1	T2				

Рисунок 5.20 — Результаты наблюдений аппаратурой ANGEL-M с функцией АЭШ слоевого заезда блока № 11. Оценка напряженного состояния кровли и почвы выработки по значениям показателя напряженности F

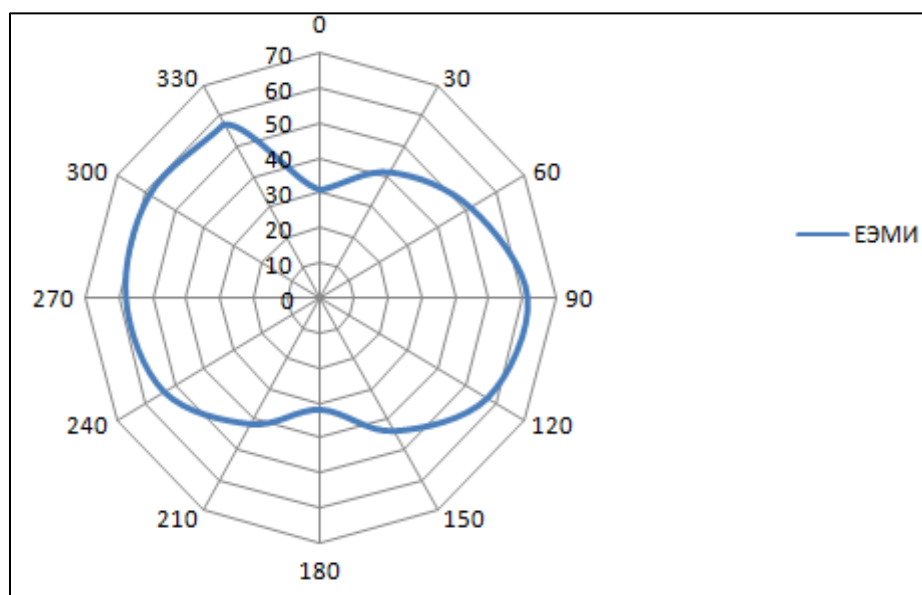


Рисунок 5.21 — Амплитудная диаграмма направленности ЕЭМИ в 3 м от забоя по контуру спирального съезда после передового торпедирования

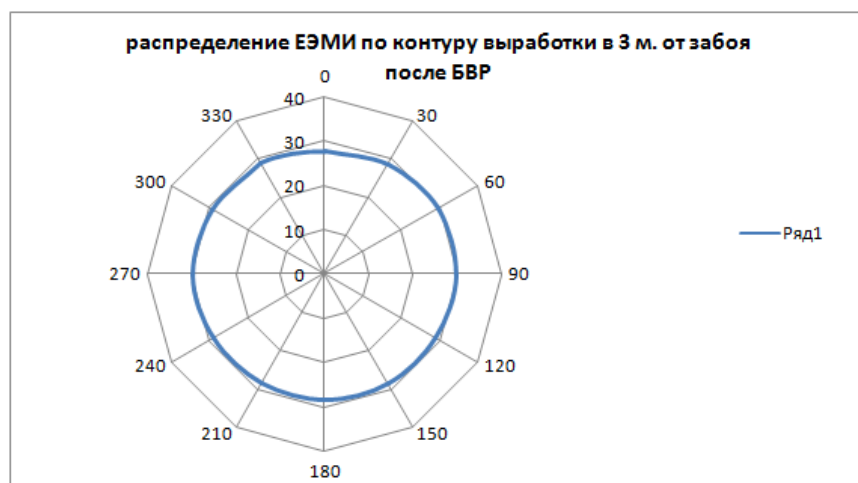


Рисунок 5.22 — Амплитудная диаграмма направленности ЕЭМИ по контуру в забое спирального съезда после взрывной отбойки

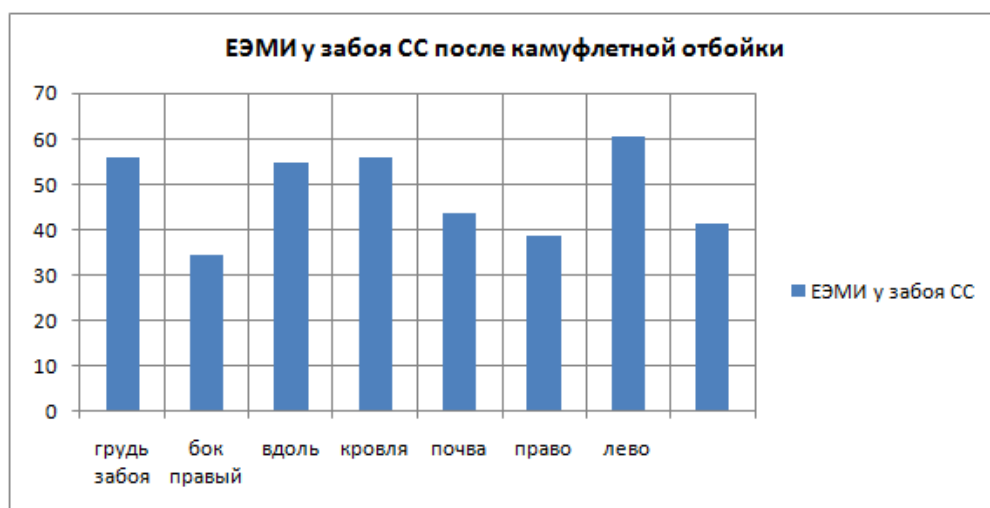


Рисунок 5.23 — Распределение амплитуды импульсов в забое спирального съезда после взрывной отбойки

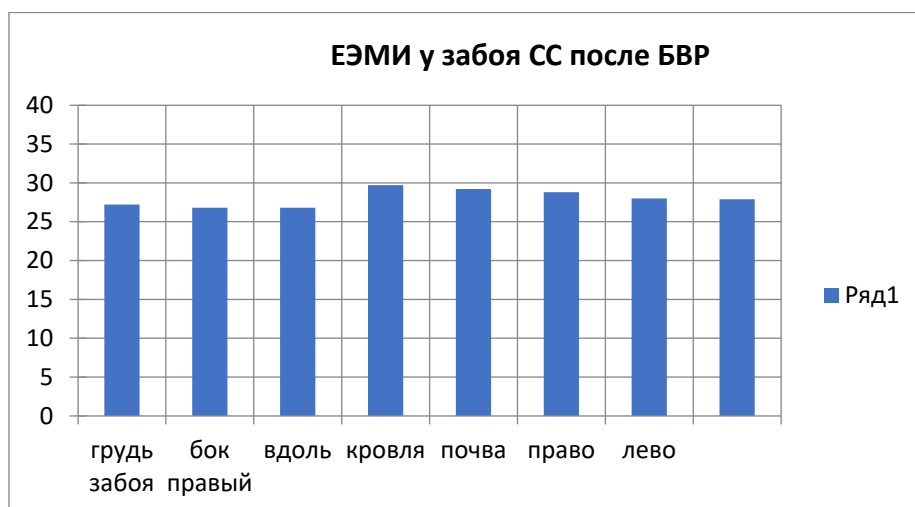


Рисунок 5.24 — Распределение амплитуды импульсов в забое спирального съезда после взрывной отбойки

Согласно представленным данным в забое СС после проведения взрывной отбойки породы по контуру четко вырисовывается ориентация распределения ЕЭМИ. Причем азимут составляет ориентировочно 20–35°. Повышенные амплитуды ЕЭМИ зафиксированы на данном участке и при профилировании.

После проведения БВР (взрывной отбойки) в забое выделить непосредственно максимальные амплитуды и, соответственно, повышенные напряжения не удалось. Диаграмма распределения амплитуды ЕЭМИ по контуру достаточно равномерна (рис. 5.22), что, возможно, свидетельствует о разгрузке массива на данном участке после БВР.

Геомеханическое состояние краевых частей выработки оценивалось методом ВЭМИ. Согласно представленным гистограммам (рис. 5.23), в геомеханическом состоянии пород массива выработки вблизи боков по степени нагруженности были выделены три основные зоны: зона пониженной нагрузки, зона максимума опорного давления и зона естественного состояния.

Вблизи боков выработки с 1 м до 2 м отмечалась зоны трещиноватости ( $F \geq 1,0$ ). Максимальная зона трещиноватости выделена на глубине 1 м. Далее вглубь массива зона трещиноватости сменялась зоной плотных пород (зона повышенных напряжений) ( $0,20 < F < 1,0$ ), граница которой доходила до 8 м. Третья зона располагалась за зоной повышенных напряжений. Геомеханическое состояние массива в данной зоне оценивалось как естественное невозмущенное.

Анализ распределения параметра  $F$  по глубине позволил установить, что максимум опорного давления в горной выработке располагался на глубине 6 метров. При данной глубине, исходя из практического опыта, состояние краевых частей выработки на данном участке оценивается как НЕОПАСНОЕ по выбросам.

Геомеханическое состояние кровли и почвы выработки, как видно из графика (рис. 5.24), характеризовалось существенной неоднородностью.



Отмечались участки как с повышенной трещиноватостью, так и с более плотными структурами. При этом максимальная зона трещиноватости распространялась на глубину зондирования до 7-8 м.

### **5.3 Обоснование параметров БВР при проведении непрямолинейных выработок**

Торпедирование горного массива показало себя эффективным способом снятия напряжений, разгрузки коллекторов газа и дегазации массива, а также снижения сейсмического воздействия последующей отбойки пород в забое на вмещающий массив. Эффект достигается в результате образования сети разветвленных трещин за контуром выработки, которые образуются после взрывания нескольких скважин по периметру забоя.

Для определения эффективных параметров зарядной скважины и заряда ВВ рассмотрен ряд условий, обеспечивающих эффективное разрушение породы при обеспечении устойчивости выработки и безопасности ведения взрывных работ.

На рисунке 5.25 представлена геометрическая схема для двух смежных скважин в сечении, проходящем через их осевые линии — AD и BE. Плоскость MN перпендикулярна сечению и представляет собой свободную поверхность забоя. Заряды ВВ цилиндрической формы в точках А и В (верхний торец) находятся на расстоянии  $l_x$  от устья скважин в точках D и E. Расстояние между скважинами равно  $a$ .

Для эффективного и безопасного торпедирования необходимо рассмотреть три условия размещения скважин.

Первое условие определяется тем, что необходимо обеспечить наложение и взаимопересечение сети трещин от взрывов в смежных скважинах. Только в этом случае удастся получить существенное и равномерное понижение напряжений в выработке и дебит газа.

Второе условие определяется тем, что при недостаточной удаленности зарядов от свободной поверхности забоя возникают откольные явления и выбросы

породы в забой. Для предупреждения этого опасного эффекта необходимо выдержать определенное расстояние  $l_x$  от заряда до поверхности забоя при установленных характеристиках зарядов.

Третье условие определяется тем, что волны напряжений от двух (и более) одновременных взрывов в результате наложения могут вызвать отколы на поверхности забоя при соблюдении второго условия. Для обеспечения безопасности в этом случае необходимо проверить и, возможно, увеличить расстояние от зарядов до свободной поверхности при заданных параметрах размещения скважин и характеристиках зарядов.

Для проверки первого условия рассмотрено взаимодействие волн напряжений, действующих от взрыва зарядов ВВ в смежных скважинах (рис. 5.25). Прохождение через массив волны радиальных  $\sigma_c$  (сжимающих) напряжений возникают и растягивающие напряжения  $\sigma_p$ , связанные следующей зависимостью:

$$\sigma_p = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_c, \quad (5.1)$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Разрушение пород растягивающими напряжениями  $\sigma_p$  рассматривается как основная причина возникновения радиальных трещин по линии одновременно взрывающихся зарядов. Это предположение и легло в основу расчета расстояния  $a$  между скважинами [44].

При взрыве заряда радиусом  $r_o$  массив породы вокруг скважины подвергается воздействию взрывного импульса. Верхняя оценка давления в продуктах детонации ВВ у стенок скважины может быть определена как:

$$P_{\text{дет}} = \frac{\rho_{\text{ВВ}} D^2}{8}, \quad (5.2)$$

где  $\rho_{\text{ВВ}}$  — плотность ВВ, кг/м<sup>3</sup>;  $D$  — скорость детонации ВВ, м/сек.

Соответственно, давление на контакте заряд-порода [44] определяется как

$$\sigma_o = P_{\text{дет}}. \quad (5.3)$$

Тангенциальные (нормальные) напряжения на стенке скважины находятся согласно (30)

$$\sigma_p = \frac{v}{1-v} \sigma_o. \quad (5.4)$$

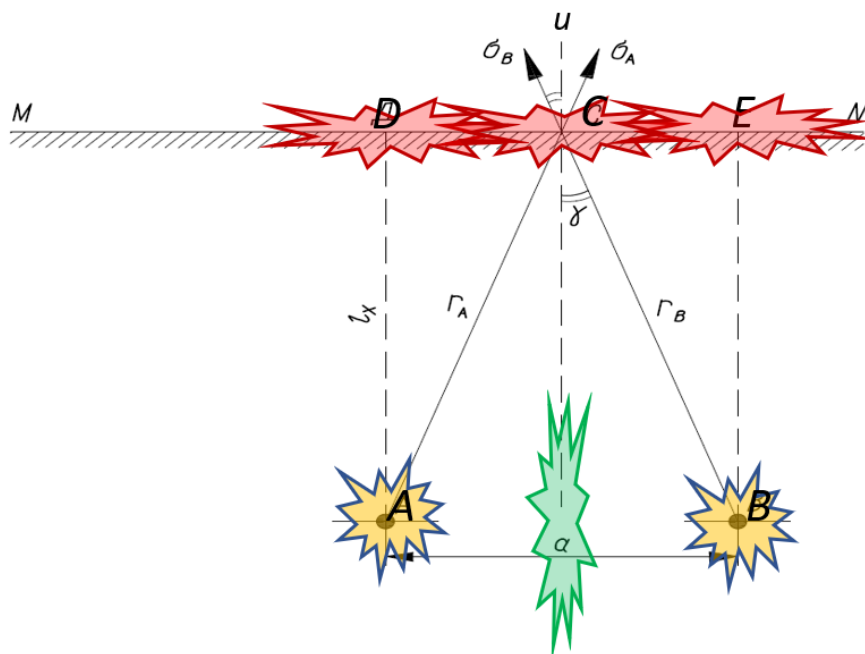


Рисунок 5.25 — Расчетная схема для определения расстояния от устья скважин до начала заряда ВВ [44]

Напряжение  $\sigma_p$  на расстоянии  $a/2$  должно затухать до величины  $[\sigma]_p/2$ , где  $[\sigma]_p$  – предел прочности породы на растяжение [44]. Предполагается, что по линии соприкосновения ударных волн  $u$  (рис. 5.25) от двух зарядов произойдет их наложение и суммарное напряжение составит  $[\sigma]_p$ , и это обеспечит сквозную трещиноватость массива [44].

Напряжения в массиве  $\sigma_r$  от взрыва заряда радиусом  $r_0$  на расстоянии  $r$  определяются законом затухания, который в зависимости от свойств породы и параметров заряда может иметь степенной, экспоненциальный и линейный вид.

По результатам опытно-промышленных работ выполнен анализ параметров зоны разрушения; установлено, что наиболее адекватно она описывается степенной функцией.

$$\sigma_r = \sigma_o (r_o/r)^n, \quad (5.5)$$

где  $n$  — зависимость коэффициента затухания от коэффициента Пуанссона.

$$n = 2 - \nu/(1 - \nu). \quad (5.6)$$

Напряжения в массиве от взрыва в одной из скважин на расстоянии  $a/2$  с учетом (5.4) и закона затухания (5.5) согласно первому условию приравнены к половине предела прочности породы на растяжение:

$$\frac{[\sigma]_p}{2} = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_o \left( \frac{r_o}{a/2} \right)^n. \quad (5.7)$$

Решение (5.7) относительно  $a$  дает расстояния между скважинами, удовлетворяющее первому условию.

$$a \leq 2r_o \sqrt[n]{\frac{2\nu\sigma_o}{(1 - \nu)[\sigma]_p}}. \quad (5.8)$$

Для выполнения второго условия необходимо, чтобы на расстоянии  $l_x$  от заряда (рис. 5.25) уже радиальные напряжения, вызванные ударными волнами от взрыва, не превышали предел прочности на растяжение. Отсюда следует, что напряжения в приближении к свободной поверхности забоя по линии  $MN$  должны быть приравнены к пределу прочности породы на растяжение:  $\sigma_r = [\sigma]_p$ .

Закон затухания для новых условий имеет вид

$$\sigma_r = \sigma_o \left( \frac{r_o}{l_x} \right)^n. \quad (5.9)$$

Заменяя  $\sigma_r$  на предел прочности  $[\sigma]_p$  и решая полученное уравнение относительно  $l_x$ , получаем граничное значение расстояния от заряда до свободной поверхности забоя, удовлетворяющее второму условию.

$$l_x \geq r_o \sqrt[n]{\frac{\sigma_o}{[\sigma]_p}}. \quad (5.10)$$

Для выполнения третьего условия оцениваются напряжения в точке С (рис. 5.25). Здесь при одновременном подрыве зарядов в точках А и В напряжения могут превысить напряжения от взрыва единственного заряда и вызвать отколы. Тогда, из геометрической схемы, где рассматривается т. С по середине между устьями скважин следует, что расстояние от зарядов составляет

$$r = r_A = r_B = \frac{l_x}{\cos \gamma}. \quad (5.11)$$

Согласно принятому ранее закону затухания напряжение в т. С от каждого из зарядов определено как

$$\sigma_r = \sigma_o \left( \frac{r_o \cos \gamma}{l_x} \right)^n. \quad (5.12)$$

Чтобы исключить отколы, результирующие напряжения от двух зарядов в т. С должны быть меньше предела прочности на растяжение

$$[\sigma]_p \geq 2\sigma_o \left( \frac{r_o \cos \gamma}{l_x} \right)^n. \quad (5.13)$$

Из геометрической схемы и известных тригонометрических зависимостей получено выражение для  $\cos \gamma$  через  $l_x$  и  $a$ :

$$\cos^2 \gamma = \frac{1}{1 + tg^2 \gamma}, \quad (5.14)$$

$$tg^2 \gamma = \left( \frac{a}{2l_x} \right)^2, \quad (5.15)$$

$$\cos^2 \gamma = \frac{l_x^2}{l_x^2 + \left( \frac{a}{2} \right)^2}. \quad (5.16)$$

Если считать причиной возникновения отколов нормальные (вдоль линии  $u$ ) к свободной поверхности напряжения, которые сразу же после отражения прямой волны меняют знак, то это позволяет рассчитать предельное расстояние до заряда, исходя из третьего условия.

Используя расстояние от заряда до т. С (5.11), закон затухания (5.12) и угол  $\cos \gamma$  из (5.16), получаем

$$[\sigma]_p \geq 2\sigma_o \left( \frac{r_o \cos \gamma}{l_x} \right)^n \cos \gamma. \quad (5.17)$$

Аналитическое решение (5.17) относительно  $l_x$  в общем случае невозможно. Но для избранных значений  $n$  можно получить некоторые упрощения. Как видно из (5.17), сложность модели определяется коэффициентом Пуассона. Например, для  $n = 2$  можно получить регулярное полиномиальное уравнение для граничного значения  $l_x$ :

$$[\sigma]_p = 2\sigma_o r_o^2 \frac{1}{l_x^2} \sqrt{\frac{l_x^6}{[l_x^2 + (\frac{a}{2})^2]^3}}; \quad (5.18)$$

$$\left[l_x^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2\right]^3 = \left[\frac{2\sigma_o r_o^2}{[\sigma]_p}\right]^2 l_x^2; \quad (5.19)$$

$$l_x^6 + 3\left(\frac{a}{2}\right)l_x^4 + 3\left(\frac{a}{2}\right)^4 l_x^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^6 = \left[\frac{2\sigma_o r_o^2}{[\sigma]_p}\right]^2 l_x^2; \quad (5.20)$$

$$l_x^6 + 3\left(\frac{a}{2}\right)^2 l_x^4 + \left\{3\left(\frac{a}{2}\right)^4 - \left[\frac{2\sigma_o r_o^2}{[\sigma]_p}\right]^2\right\} l_x^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^6 = 0. \quad (5.21)$$

Уравнение удобно для численного решения и имеет аналитическое решение, т.к. может быть перестроено в виде кубического уравнения относительно  $l_x^2$ . Однако такое значение коэффициента затухания  $n$  согласно (5.6) реализуется при очень малых значениях  $\nu$  ( $\nu \rightarrow 0$ ), что нехарактерно для большинства пород.

Коэффициент затухания  $n = 1$  получается при  $\nu \rightarrow 0,5$ , что также мало соотносится со свойствами реальных горных пород. Регулярное полиномиальное уравнение для граничного значения здесь имеет вид

$$\sigma_P l_x^4 - 2\sigma_o r_o l_x^3 + \frac{\sigma_P a^2}{2} l_x^2 + \frac{\sigma_P a^4}{16} \geq 0. \quad (5.22)$$

Уравнение (5.22) при некоторых соотношениях параметров также может иметь аналитическое решение, но опять же лишено практического смысла.

Выбор, например,  $\nu = 0,25$ , которое, наоборот, является характерным значением, дает  $n = 5/3$ . Подстановка этого значения дает уравнение

$$k^3 \left( l_x^2 + \frac{a^2}{4} \right)^8 - l_x^1 = 0, \text{ где } k = \frac{\sigma_p}{2\sigma_0 r_0^{5/3}} \quad (5.23)$$

На этих примерах видно, что из-за больших степеней и соответствующего числа корней численное решение (5.17) будет крайне неустойчивым. Поэтому практичнее переписать исходное неравенство в общем виде для проверки параметров размещения заряда ( $l_x$  и  $a$ ) при заданных характеристиках пород и заряда ВВ ( $[\sigma]_p, \sigma_0, r_0$ ) в виде

$$\frac{l_x^{n+2}}{\left( l_x^2 + \frac{a^2}{4} \right)^{n+1}} \leq \frac{\sigma_p}{2\sigma_0 r_0^n} \quad (5.24)$$

и исследовать это неравенство на возможность выполнения для реальных диапазонов значений параметров.

Используемый в формулах радиус заряда предполагает его сферическую форму. При сильных диспропорциях трех линейных размеров заряда, согласно работам Г. И. Покровского, необходимо учесть изменение в процессе распространения ударных волн и ввести эквивалентный радиус сферического заряда. Для цилиндрической формы известна формула<sup>8</sup>

$$r_0 = k^3 \sqrt[3]{3R^2 L / 4}, \quad (5.25)$$

где  $r_0$  — эквивалентный радиус;  $R$  — радиус цилиндрического заряда;  $L$  — длина (высота) цилиндрического заряда;  $k$  — коэффициент, зависящий от свойств ВВ, условий взрыва и соотношения размеров заряда. Для очень тонких (шнуровых) зарядов он составляет  $\sim 0,8$ .

Соотношение линейных размеров заряда фактически определяется размерами скважины, а ее размеры, в свою очередь, определяются условиями ведения работ и имеющимся буровым оборудованием. Типовые параметры скважин и характеристик ВВ для ведения буровзрывных работ в шахтах составляют:

---

<sup>8</sup> Покровский Г. И. Взрыв. 4-е издание, переработанное и дополненное. Москва: Недра, 1980.

1. Диаметр — обычно 36–43 мм, реже до 50 мм, в слабых породах 28–36 мм, в крепких породах допускается до 60 мм.

2. Длина — обычно 1,2–3,5 м, чаще 1,5–2,5 м, в подготовительных выработках допускается 3–5 м.

3. Правилами безопасности ограничивается минимальная длина забойки — не менее 0,8 м, в отдельных случаях допускается 0,5 м.

4. Диаметр заряда, во-первых, для простоты размещения должен быть меньше диаметра скважины. Во-вторых, при БВР применяются, как правило, шнуровые ВВ, что определяет минимальный размер и дискретность радиуса заряда.

Объективные условия проектирования БВР в условиях действующего предприятия приводят к тому, что единственными управляемыми параметрами оказываются радиус (диаметр) и длина заряда. Диаметр шнуровых зарядов, применяемых на рудниках, изменяется дискретно, а также лимитируется возможностью размещения в скважине заданного диаметра. Поэтому для выбора (оптимизации) параметров БВР фактически остается только длина заряда.

Полученные неравенства полезны в практическом отношении, т.к. позволяют гибко оценивать параметры БВР на эффективность и безопасность. В методическом плане неравенства позволяют определить диапазоны рациональных значений параметров, удовлетворяющих одновременно всем выдвинутым условиям.

Сравнивая структуру (5.8) и (5.10), нетрудно увидеть, что  $a/l_x = 2^n \sqrt{2v/(1-v)}$ . Тогда для диапазона значений коэффициента Пуассона (обычно  $v = [0,2; 0,4]$ ) отношение граничных значений расстояния между скважинами и расстояния до свободной поверхности забоя везде больше 1 и гладко возрастает в диапазоне (1,3; 2,5). В итоге можем заключить, что неравенства (5.8) и (5.10) ограничивают некоторое расстояние сверху и снизу, а следовательно, могут быть решены совместно.



Фактическое расстояние от центра эквивалентного сферического заряда до свободной поверхности забоя, согласно ПБ, составляет длину забойки (обозначено как  $Z$ ) плюс от 0,4 до 0,5 от длины заряда ( $L$ ). Подстановка (5.25) в (5.8) и (5.10) дает систему, которая определяет геометрию размещения зарядов

$$\begin{cases} a \leq 2k\sqrt[3]{R^2L} \left( \frac{2v}{(1-v)} \frac{\sigma_o}{[\sigma]_p} \right)^{1/n}, \\ l_x \geq \sqrt[3]{R^2L} \left( \frac{\sigma_o}{[\sigma]_p} \right)^{1/n}, \\ l_{fact} = Z + L/2. \end{cases} \quad (5.26)$$

где, управляя длиной забойки и количеством ВВ через длину и радиус заряда, можно подобрать (выбрать) такие их значения, что будут выполнены все условия. Графическое представление решения системы (5.26) для длины заряда  $L$  представлено на рисунке 5.26.

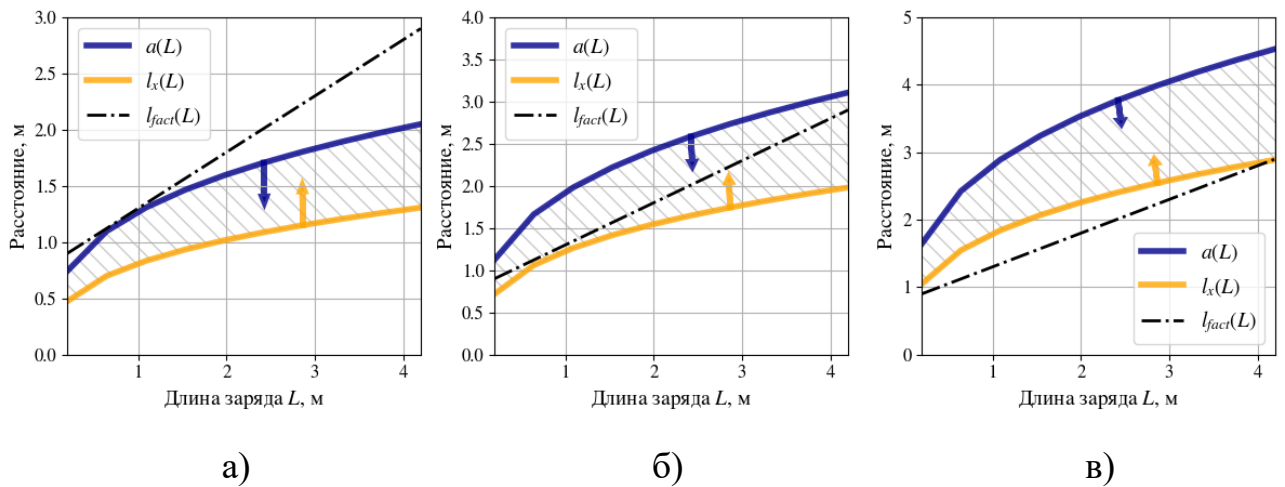


Рисунок 5.26 — Определение зоны рациональных параметров БВР при установленных характеристиках пород и заряда ВВ:

$$v = 0,25; R = 0,01 \text{ м}; Z = 0,8 \text{ м};$$

$$\text{а) } \sigma_o/[\sigma]_p = 200, \text{ б) } \sigma_o/[\sigma]_p = 400, \text{ в) } \sigma_o/[\sigma]_p = 750$$

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 желаемой длины заряда: для той части линии, которая попадает в разрешенную область, оба условия выполняются автоматически.

Для сравнения показаны три случая  $\sigma_o/[\sigma]_p$  из характерного диапазона дробления ( $100 < \sigma_o/[\sigma]_p < 1000$ ). Видно, что подобрать длину заряда при других фиксированных параметрах так, чтобы выполнить условия (5.8) и (5.10), удастся, например, при  $\sigma_o/[\sigma]_p = 400$  (рис. 5.26-б).

Соответственно, на рисунке 5.26-а иллюстрируется ситуация, когда воздействия взрыва (количества ВВ) недостаточно для разрушения массива между скважинами по условию (5.8), а на рисунке 5.26-в — когда воздействие взрыва избыточно по условию (5.10) и может вызвать отколы вокруг устья скважины.

Условие (5.24), ввиду отсутствия решения в явном виде, может быть проверено для комплекса параметров путем подстановки численных значений. Учитывая, что  $l_x \equiv l_{fact} \cong Z + 0,5L$ , и подставляя это определение в (5.24) вместе с (5.25), получаем неравенство, выполнение которого исключает отколы в т. С при одновременном взрывании двух зарядов с учетом всех параметров.

$$\frac{\sigma_p}{2\sigma_0 k^n \left(\frac{3}{4}R^2\right)^{n/3}} \geq L^{n/3} \times \frac{\left(Z + \frac{L}{2}\right)^{n+2}}{\left(\left(Z + \frac{L}{2}\right)^2 + \frac{a^2}{4}\right)^{n+1}} \quad (5.27)$$

Такое представление удобно для анализа, т. к. два хорошо управляемых параметра разнесены в разные части неравенства. Если обозначить левую часть неравенства как  $g(R)$ , а правую как  $f(L)$ , то неравенство (5.27) можно переписать в виде

$$g(R) \geq f(L) \quad (5.28)$$

или

$$f(R, L) = g(R) - f(L) \geq 0. \quad (5.29)$$

Пространство допустимых для выполнения неравенства значений параметров наглядно представить для некоторого набора фиксированных значений неуправляемых параметров в виде изолиний  $f(R, L)$ . На рисунке 5.27 представлен такой график.

Здесь нулевая изолиния (сплошная красная) показывает границу, где  $g(R) \cong f(L)$ . На ней и ниже нее находятся комбинации значений радиуса и длины заряда, удовлетворяющие условию (5.27).

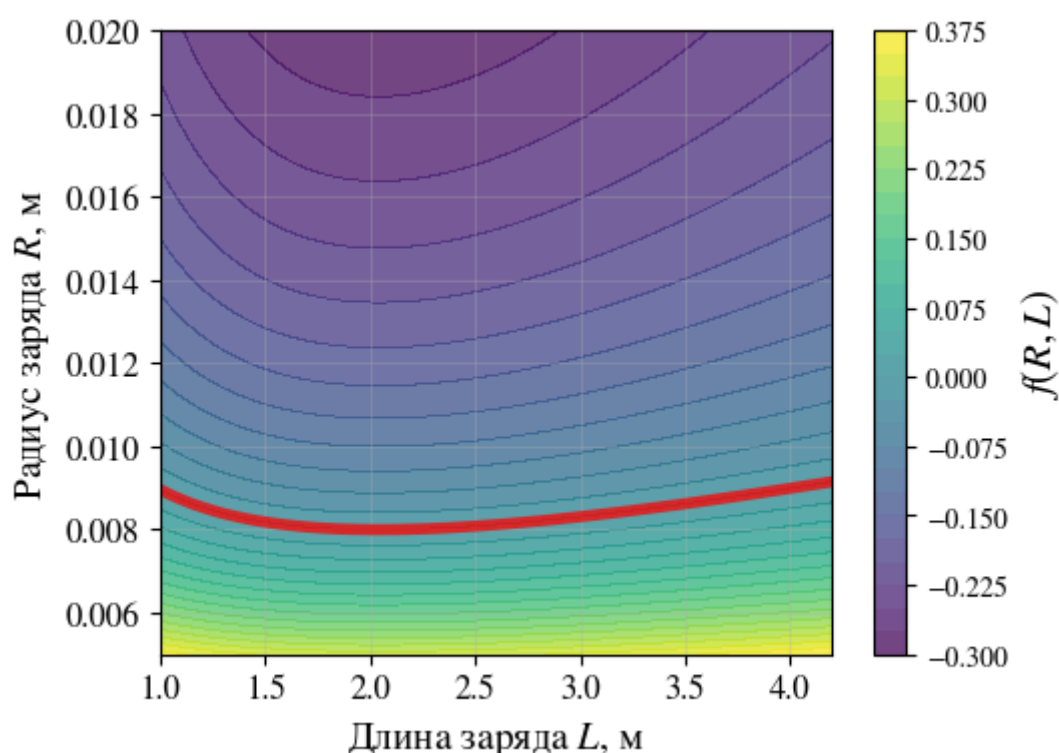


Рисунок 5.27 — Определение зоны выполнения условий по отколам при одновременном взрывании двух зарядов:

$$v = 0,25; R = 0,01 \text{ м}; Z = 0,8 \text{ м}; \sigma_o/[\sigma]_p = 400; a_{fact} = 1,2.$$

Сплошная красная линия — нулевая изолиния

Объединяя условия (5.26) и (5.27) в единый комплекс, можно подобрать в численном режиме эффективные и безопасные параметры БВР. На рисунке 5.28 приведен пример, где проведена проверка параметров БВР, примененных в опытно-промышленных работах на руднике «Интернациональный». Здесь

установлены следующие значения:  $v = 0,25$ ;  $R = 0,01$  м;  $Z = 0,8$  м;  $\sigma_o/[\sigma]_p = 400$ ;  $k = 0,8$ .

Так как линия  $l_{fact}$  попадает в разрешенную зону, то выбор любой адекватной ( $1,0 < L < 5 - Z$  м) длины заряда  $L$  обеспечивает выполнение условия (5.26). При выборе длины заряда  $L = 4,2$  м и расстояния между скважинами  $a = 1,3$  м получаем: фактически принятое расстояние между скважинами в 1,3 м меньше предельного ( $\sim 3,1$  м), что удовлетворяет условию (5.8); фактическое расстояние от эквивалентного сферического заряда до свободной поверхности составляет 2,9 м, что больше предельного ( $\sim 2,0$  м) и удовлетворяет условию (5.10); значение функции  $f(R, L) \geq 0$ , что удовлетворяет условию (5.27).

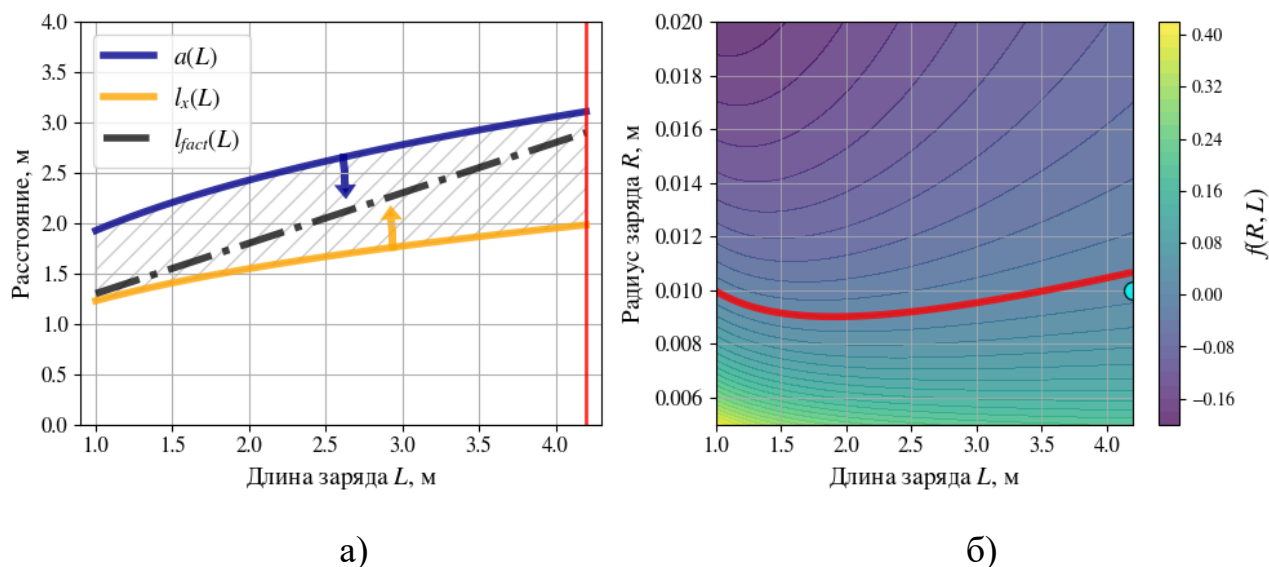


Рисунок 5.28 — Комплексная проверка параметров БВР

на эффективность и безопасность: а) вертикальная красная линия показывает выбранную длину заряда; б) светлый маркер показывает значение функции  $f(R, L)$  при заданных параметрах

## 5.4 Выводы по главе 5

1. Разработан порядок расчета параметров передового торпедирования, обеспечивающий формирование за контуром выработки непрерывной зоны наведенной трещиноватости при отсутствии развязывания

внезапного выброса, служащий для снятия напряжений, разгрузки коллекторов газа и дегазации массива, а также снижения сейсмического воздействия последующей отбойки пород в забое на ГГМ.

2. 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.

3. 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 газодинамических явлений (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.

## **Глава 6. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МЕР ПО ПРОГНОЗУ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА УГОЛЬНЫХ И РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ**

### **6.1. Особенности газодинамических явлений на руднике «Интернациональный» и общие подходы к прогнозу ГДЯ**

Внезапные выбросы на руднике «Интернациональный» имеют общие черты с внезапными выбросами породы и газа, происходящими на угольных шахтах в Донбассе, но в то же время имеют существенные отличия от них [23, 127]:

В Донбассе выбрасываются песчаники, вмещающие высокогазоносные пласты угля, от которых они насыщаются газом и имеют газоносность на порядок выше, чем выбросоопасные доломиты;

Выбросы песчаников начались с глубины 677 м, а выбросы доломитов – с глубины 1210 м. Выбросы песчаников происходят в окрестности забоя, а выбросы доломитов часто происходят позади забоев на несколько метров;

Состав свободного газа в горном массиве существенно отличается от состава его на других рудниках и угольных шахтах. Особым обстоятельством является присутствие в нем большого содержания водорода – до 10, а иногда более процентов.

С учетом полученного ранее, в основном, на угольных пластах опыте полагалось, что потенциально выбросоопасный слой породы в зоне вскрытия горной выработкой не подвержен влиянию на него горных работ вследствие запирающего действия породной пробки между ним и выработкой до вскрытия.

Но в момент вскрытия забой, вскрывающий выработки, сразу попадает в совершенно неразгруженную от горного и газового давления зону выбросоопасного слоя. Поэтому вероятность внезапного выброса в данный момент самая высокая. Газодинамическое состояние породы выбросоопасного слоя во вскрываемой зоне может быть уподоблено состоянию насыщенного газом под высоким давлением породного брикета.

Результаты шахтных и лабораторных испытаний подтверждают, что основными критериями прецизионной оценки выбросоопасности являются давление газа и прочностные свойства породного массива в области ведения работ по вскрытию [233].

Например, согласно исследованиям НЦ ВостНИИ стадий внезапного выброса, в подобных условиях выброс начинается с третьей стадии – газового дробления, возникновение которой и интенсивность определяются в основном давлением газа и прочностью породы.

Давление газа характеризует активную силу внезапного выброса, а коэффициент крепости – препятствующую ей пассивную силу. На основе анализа такого баланса сил авторами [74, 165] предложен метод прогноза ГДЯ по значению показателя выбросоопасности на основе крепости вскрываемого слоя пород

$$П = P_{г.мах} - 14f_{мин}, \quad (6.1)$$

где  $P_{г.мах}$  – наибольшее из зарегистрированных значение давления газа, кгс/см<sup>2</sup>;  $f_{мин}$  – минимальное значение коэффициента крепости породы. Если  $П \geq 0$ , то зона опасна по, если  $П < 0$  – неопасна [224].

Определенный консенсус здесь состоит в том, что выбросоопасность массива при антропогенном воздействии обусловлена резким перепадом газового давления, потерей несущей способности пород и возникновением систем связно-замкнутой трещиноватости.

При этом подвигание забоя в данных зонах сопряжено с увеличением газовыделения с существенными флуктуациями, что подтверждается показаниями систем газового контроля (рис. 6.1).

В ряде исследований сторонних авторов [176, 232] рассматриваются критерии выбросоопасности, базирующиеся на данных автоматизированных систем газового контроля. В частности, предложен показатель эффективной газоносности [232], рассчитываемый как разница между исходной и остаточной газоносностью. Данный параметр интегрирует комплекс технологических и газодинамических характеристик создания выработки в горном массиве:

длительность реакции среды на выемку, динамику концентрации метана и расхода воздуха, фоновые показатели, а также геометрические и производственные факторы (сечение выработки, шаг подвигания забоя, объем добытой горной массы) [176].

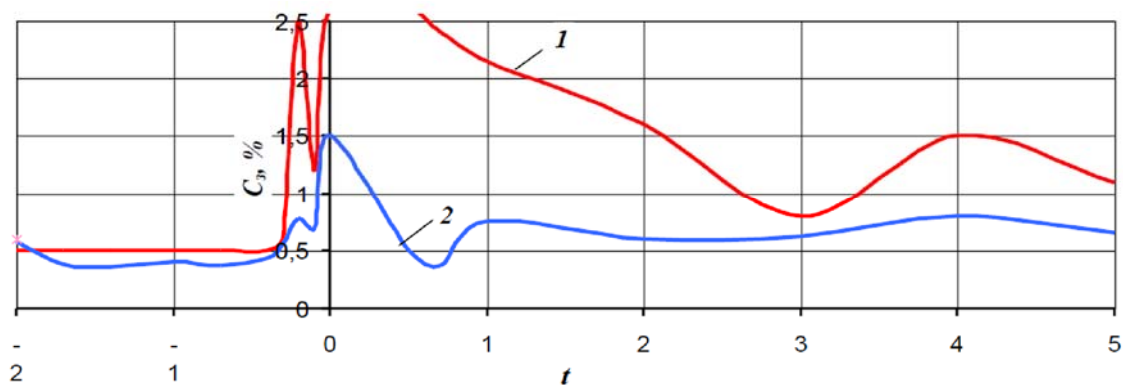


Рисунок 6.1 – Диаграмма концентрации метана при внезапном выдавливании угля с повышенным газовыделением (ш. «Бирюлинская», Кузбасс) [92]

В этом методе предполагается, что критическое значение эффективной газоносности для разделения выбросоопасных и неопасных зон должно устанавливаться по результатам натурных наблюдений в подземных условиях. Очевидно, что идентифицировать (подобрать) такое количество параметров для изменчивых (даже в пределах пласта) ГГУ крайне затруднительно. Либо следует принять, что модель довольно грубая и можно использовать средние значения параметров, но тогда утрачивается локальность прогноза.

Основной аргумент использования такого подхода к оценке выбросоопасности заключается в возможности почти полной ее автоматизации в условиях относительно ритмичной комбайновой проходки и добычи, т.к. наиболее изменчивые (газовые) показатели и так автоматически контролируются. Возможность реализации такого подхода на рудниках с проходкой буровзрывным способом остается под вопросом.

Геофизические методы прогноза выбросоопасности, прежде всего, акустической и, чуть позднее, электромагнитной эмиссии известны давно. Их адекватность задачам локального прогноза геомеханических и газодинамических



явлений в различных ГГУ подтверждена в лабораторных и натурных экспериментах.

При развертывании опытно-промышленных работ на руднике «Интернациональный» выбор методов и их аппаратных реализаций определялся такими аспектами как оперативность и чувствительность.

Сравнительный анализ показал, что электромагнитный мониторинг (по критерию  $A_{cp}$ ) обеспечивает заблаговременное обнаружение опасных зон в сравнении с прямыми измерениями газовыделения. Если традиционный показатель  $g_{н.мах}$  сигнализирует об опасности непосредственно в защитной зоне, то параметр ЕЭМИ демонстрирует максимум с опережением в один цикл. Это доказывает эффективность бесконтактных систем непрерывного контроля, способных улавливать деформационные процессы в массиве раньше, чем они приведут к значимому росту метановыделения в скважинах и акустической эмиссии [233, 66].

Таким образом, выбор в пользу геофизических методов для снижения трудоекости и повышения оперативности видится обоснованным.

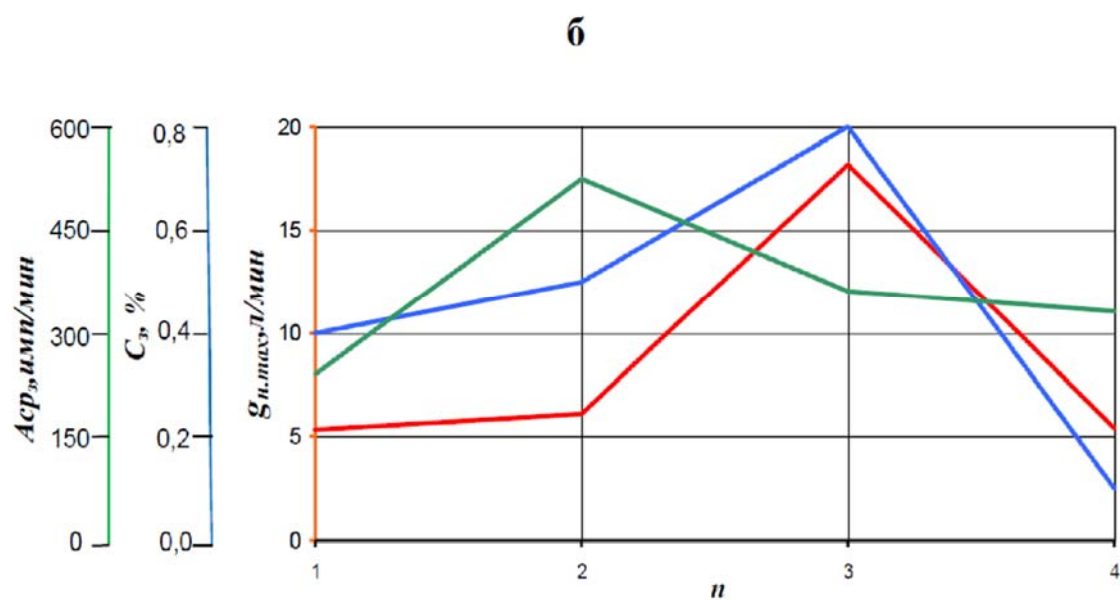
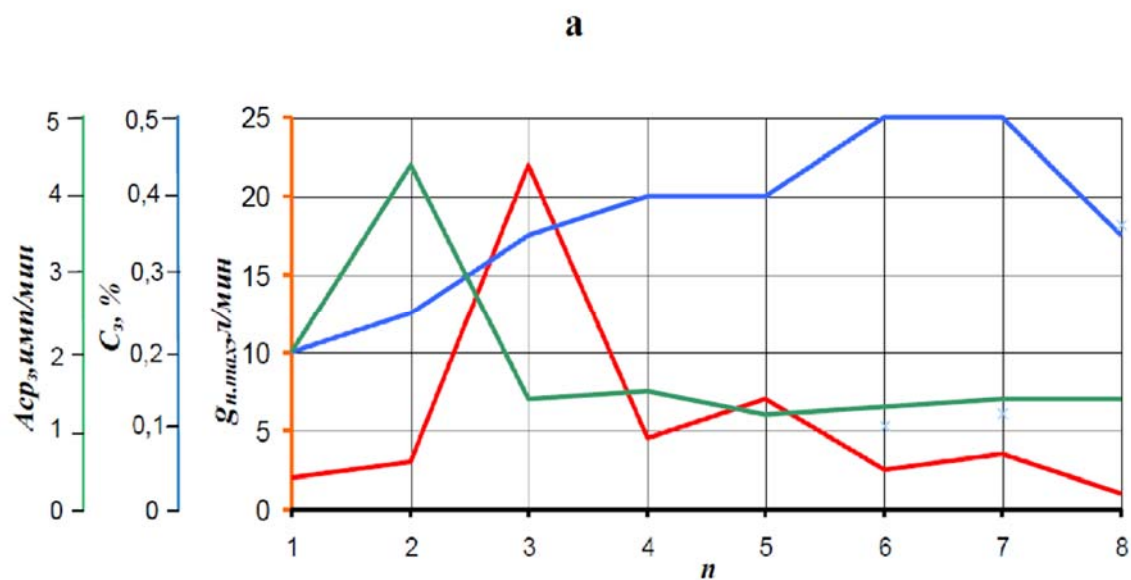


Рисунок 6.2 – Сравнение показателей выбросоопасности  
в циклах измерений при приближении к выбросоопасной зоне.

- а) ш. «Чертинская», вентиляционный уклон №2;
- б) ш. «Новая», конвейерный штрек 416 по пласту 4

## **6.2. Метод прогноза выбросоопасности на угольных месторождениях на основе параметров ЕЭМИ**

Прогноз выбросоопасности требуется и осуществляется согласно Инструкции Госгортехнадзора России по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа (РД 05-350-00) [81], в том числе, требуется локальный и текущий прогноз выбросоопасности пластов. Локальный прогноз требуется в условиях явной или проектной угрожаемости пластов по выбросоопасности на глубинах критических по выбросам. Текущий прогноз требуется при проведении подготовительных выработок по выбросоопасным и особо выбросоопасным пластам с целью выявления опасных и неопасных по выбросам зон.

Текущий прогноз выбросоопасности позволяет оценить необходимость применения тех или иных способов снижения выбросоопасности пласта и гибко управлять состоянием массива, что снижает трудоемкость и повышает скорость проведения выработок в ГГМ.

Классические методы прогноза описаны в 1.6. Наиболее известным и технически (приборно) обеспеченным является метод прогноза по амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ) акустического сигнала [173]. Он относится к геофизическим методам, и может применяться без внедрения в горный массив, что значительно облегчает и ускоряет процесс оценки напряженного и выбросоопасного состояния. Вместе с тем, как и любой известный геофизический метод он является косвенным, что приводит к неизбежным методическим затруднениям при интерпретации свойств геофизических полей в свойства полей напряжений. Поэтому необходимо четкое представление о физических основах и ограничениях соответствующих интерпретаций.

Таким образом, геофизические методы оказываются привязанными к необходимости предварительной калибровки с помощью основных методов прогноза выбросоопасности – по начальной скорости газовыделения и выходу буровой мелочи [81].

В настоящей работе предложен метод текущего прогноза выбросоопасности участков угольных пластов по регистрации и измерению параметров ЕЭМИ геофизическим комплексом ANGEL-M, который был успешно опробован на угольных шахтах Кузбасса и Республики Казахстан.

Геофизический комплекс ANGEL-M предназначен для оценки напряженного состояния углепородного массива и прогноза выбросоопасности участков угольных пластов. Оценка степени выбросоопасности осуществляется сравнением результатов выполненных измерений с пороговыми значениями прогностических параметров (далее критериями) выбросоопасности, установленными для шахтопластов, угрожаемых и опасных по внезапным выбросам угля и газа, по результатам опытно-промышленных испытаний.

Для уточнения и поддержания в актуальном состоянии базы данных пороговых значений прогностических параметров для метода ЕЭМИ с применением комплекса ANGEL-M необходимо периодически, но не реже одного раза в год производить сопоставительные измерения совместно с одним из базовых методов прогноза выбросоопасности.

Замеры производятся по нарушенной пачке. Если пласт имеет две перемятые пачки угля одинакового типа, то замеры производят по пачке, имеющей большую мощность.

Во время измерений, выполняемых комплексом ANGEL-M, все источники электромагнитного излучения: забойные механизмы, электроаппаратура и кабели (кроме аппаратуры газовой защиты), излучающие кабели (FLEXCOM), радиопередающие устройства (рации, беспроводные пульта управления и т.п.) – должны быть обесточены или удалены на расстояние до 5 м от места измерения.

При измерении ЕЭМИ магнитная антенна комплекса ANGEL-M устанавливается от исследуемого участка массива (забоя, стенки выработки, почвы) на расстоянии не далее 0,5 м. Рабочим положением антенны является положение, при котором антенна (ось антенны) направлена на объект исследования (забой, стенки, кровля, почва). Точность положения линии установки антенны относительно ее оси не должна быть хуже 50.

При отсутствии возможности устранения электромагнитных помех при измерениях комплексом ANGEL-M антенна помещается в имеющиеся или специально отбуренные в точках измерений шпуры (скважины) на глубину до 1 метра.

В проводимых подготовительных горных выработках измерения ЕЭМИ для прогноза выбросоопасности угольного пласта производятся в следующих местах [81]:

- первое определение выполняется в подготовительной горной выработке после вскрытия пласта или на участке засечки горной выработки только совместно с одним из базовых методов прогноза;
- последующее определение в подготовительной горной выработке выполняется совместно с одним из базовых методов прогноза периодически;
- периодичность проведения совместных измерений определяется по согласованию с разработчиком метода или согласно [81, п. 2.4.10].

В забое подготовительной выработки замеры производятся в трех точках, крайние точки замеров располагаются на расстоянии 1-1,5 м от боков. Направление антенны на забой по нормали. Направление антенны в крайних точках, вдоль выработки с углом поворота вбок 10-15° (ось антенны пересекает условную границу контура борта выработки) (рис. 6.3).

При проведении выработок в сложных горно-геологических условиях для оперативного прогноза выбросоопасности и оценки состояния массива следует внедрить дополнительные измерения методом ЕЭМИ. Замеры необходимо выполнять в боках выработки с обеих сторон на двух рубежах: в ближней зоне (1,5-3,0 м от забоя) и на удалении от забоя (4-10 м). Принимается, что наблюдения в одном пункте заменяет бурение одной прогнозной скважины.

Контроль эффективности производят на участках, где была установлена категория ОПАСНО и проведены профилактические мероприятия по предупреждению внезапных выбросов.

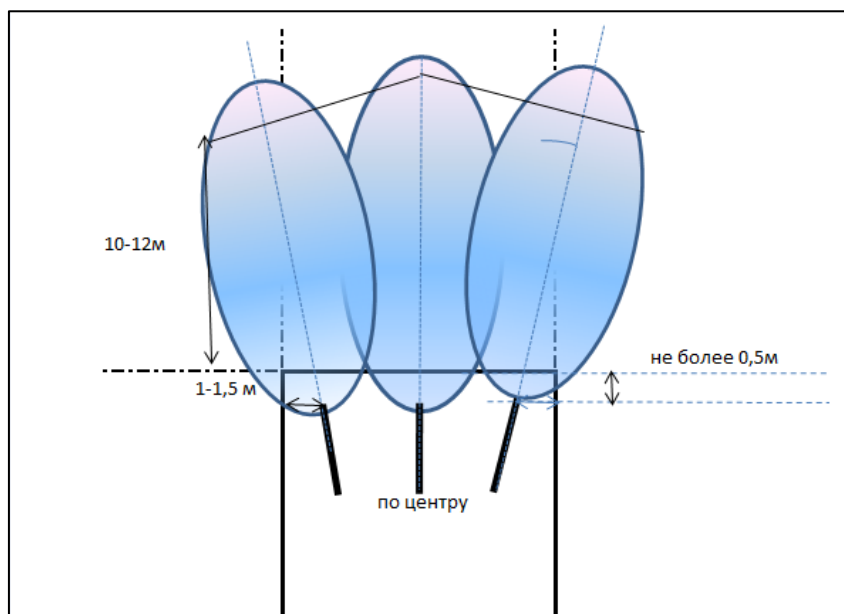


Рисунок 6.3 – Положение антенны при зондировании забоя выработки методом ЕЭМИ. Овалом обозначена диаграмма направленности антенны и зона максимальной чувствительности

Контроль эффективности профилактических мероприятий осуществляется теми же методами и с установленными критериями, что и прогноз выбросоопасности участков шахтопласта для подготовительных выработок. При этом замеры производятся в тех же местах, где был произведен прогноз выбросоопасности.

Прогноз осуществляется за счет дистанционного приема антенной прибора электромагнитных импульсов в диапазоне частот, генерируемых электрическими разрядами в трещинах при разрушении и деформировании краевых участков угольного пласта под действием горного и газового давления. Импульсные сигналы от антенны поступают в регистратор, где по специальной программе происходит их обработка. Обработанные сигналы заносятся в блок памяти. По накопленной в течение временного интервала  $T$  выборке происходит селекция импульсов с высокими и низкими амплитудами (энергиями)  $A$ . Определяется их количество  $N_{\max}$ ,  $N_{\min}$  и соотношение  $B$  количества  $N_{\max}/N_{\min}$ .

Основными регистрирующими параметрами ЕЭМИ являются амплитуда импульсов  $A$  и интенсивность  $B$  – количество импульсов определенной амплитуды  $A$  в единицу времени. Эти параметры непосредственно зависят от

уровня напряжений и происходящих процессов в массиве, что позволяет использовать для оценки напряженно-деформированного состояния массива и количественно оценить степень его выбросоопасности. Дополнительным параметром ЕЭМИ, позволяющим дифференцировать электромагнитные импульсы по спектру, является частота  $F$ , на которой они генерируются. Полученные параметры выражаются в единицах фоновых (безопасных) уровня параметров  $A_0$  и  $B_0$ .

Категория НЕОПАСНО присваивается участку угольного пласта при условии, что зарегистрированные значения параметров  $A$  и  $B$  не превышают значений пороговых показателей  $A_0$  и  $B_0$  ЕЭМИ, для которых установлена категория НЕОПАСНО. Данный участок угольного пласта, на котором проводится прогноз выбросоопасности методом ЕЭМИ, относят к категории НЕОПАСНО.

В случае превышения зафиксированных значений параметров  $A$  и  $B$  на данном участке хотя бы одному из установленных пороговых значений прогностических параметров, необходимо провести прогноз выбросоопасности одним из базовых методов.

Если один из основных методов прогноза показал категорию ОПАСНО, то необходимо применение технических и технологических мер предотвращения ГДЯ. Если основным методом по скорости газовыделения и выходу буровой мелочи для участка установлена категория НЕОПАСНО, то полученные значения прогностических параметров ЕЭМИ, после согласования с разработчиком метода прогноза выбросоопасности принимаются в качестве пороговых значений прогностических параметров, соответствующих категории НЕОПАСНО для данного шахтопласта [81, 173].

Результаты измерений ЕЭМИ, их обработки и соответствующей категории прогноза, установленной на их основе для данного участка, заносят в журнал по форме, приведенной в приложении 4.

Место измерения ЕЭМИ отмечается на выкопировке с плана горных работ точкой с записью даты и времени измерения:

- Line – номер геофизического профиля;
- Picket – номер пикета, на котором был произведен замер;
- Comp. – ориентация антенны при замере. 1 антенна направлена на грудь забоя, 2 антенна - параллельно груди забоя; 3 антенна – вертикально;
- $t[s]$  – время замера, сек. Время выбирается оператором при замере и может составлять 10; 20; 40; 80 сек;
- $A[mkV]$  – амплитуда импульсов, зарегистрированных в заданный промежуток времени;
- $L1[mkV]$  – показатель амплитуды на уровне №1 (минимальный уровень);
- $L10[mkV]$  – показатель амплитуды на уровне №10 (максимальный уровень);
- В – показатель распределения амплитуд импульсов по 10-ти уровням ( $tg$  угла наклона прямой распределения).

Пороговые значения для оценки выбросоопасности в месте проедения выработки определяются согласно методике АО «ВНИМИ» по результатам анализа данных, полученных при проведении наблюдений с использованием геофизического прибора «ANGEL-M» с учетом условий конкретной шахты [82-85].

В процессе эксплуатации геофизического комплекса ANGEL-M при изменении горно-геологических и горнотехнических условий ведения горных работ (переход на большие глубины, другие угольные пласты/выемочные участки), пороговые значения прогностических параметров метода по регистрации ЕЭМИ могут изменяться по согласованию с организацией-разработчиком.

Ниже в таблицах 6.1 и 6.2 приведены примеры пороговых значений прогностических параметров (критерии) прогноза степени выбросоопасности определенные для шахт УД АО «Арселор Миттал Темиртау». Показатели А и В, не вошедшие в указанный в таблице диапазон, отнесены к категории ОПАСНО.



Схематически область, которая отнесена к категории НЕОПАСНО представлена на рисунке 6.4. Значения, которые не попадают в диапазон, указанный в схеме, должны быть отнесены к категории «ОПАСНО».

Таблица 6.1 – Средние из установленных пороговых значений прогностических параметров прогноза выбросоопасности

Наименование прогностического параметра	Обозначение	Пороговые значения
Минимальная амплитуда импульсов в цикле измерения;	A2	21,4
Максимальная амплитуда импульсов в цикле измерения;	A1	27,1
Минимальное значение угла наклона прямой распределения.(tg $\alpha$ )	B1	0,181
Максимальное значение угла наклона прямой распределения.(tg $\alpha$ )	B2	0,229
Максимальное значение параметра В, при которой фиксируется состояние «ПОМЕХА»(tg $\alpha$ )	B3	0,4

Таблица 6.2 – Диапазоны значений прогностических параметров и соответствующие категории выбросоопасности

Критерии выбросоопасности	Диапазоны значений прогностических параметров ЕЭМИ и соответствующие им категории выбросоопасности	
Условие 1	$A \leq 21,4$	$A \geq 21,4$
Условие 2	$B \geq 0,181$	$B \leq 0,181$
Условие 3	$0,4 > B \geq 0,229$ и $A \leq 27,1$	$B \leq 0,229$ и $A \geq 27,1$
Категория выбросоопасности	НЕ ОПАСНО	ОПАСНО

Алгоритм отнесения к категории «НЕОПАСНО» по предложенным прогностическим параметрам представлен на рисунке 6.5.

Примечание: к категории «НЕОПАСНО» отнесена заштрихованная область по факту отнесения числовых значений прогностических параметров А и В при выполнении одного из вышеуказанных условий (Условие 1 – А меньше А2 Условие 2- В больше В1. Условие 3 – А меньше А1 и В меньше В3 но больше В2). Построение графика следует производить с использованием логарифмической шкалы оси параметра В (для повышения наглядности).

С 2019 года на шахтах АО «АрселорМиттал Темиртау» проводилась опытно-промышленная эксплуатация методики по оценке напряженно-деформирования состояния массива по регистрации естественной электромагнитной эмиссии с помощью геофизического комплекса ANGEL-M при прогнозе выбросоопасности участков угольных пластов шахт: «Им. Ленина»,

«Им. Костенко», «Шахтинская», «Казахстанская», «Им. Кузембаева», «Абайская», «Саранская».

В течении 2020 года прогноз выбросоопасности проводился в подготовительных забоях методом ЕЭМИ при использовании комплексов ANGEL-M. В ходе проведенной обработки данных установлена корреляция методов для определения категории выбросоопасности. Это подтверждается данными по текущему прогнозу выбросоопасности с шахты им. Ленина и с шахты Казахстанская.

Например, на шахте им. Ленина при прогнозе выбросоопасности базовым методом зарегистрирована категория «ОПАСНО» 21.05.2021 г., 07.06.2021 г., прогнозом выбросоопасности методом ЕЭМИ зарегистрировано превышение установленных пороговых значений 21.05.2021 г. и 07.06.2021 г.

На шахте Казахстанская при прогнозе выбросоопасности базовым методом зарегистрирована категория «ОПАСНО» 27.06.2021 г., 11.07.2021 г., 11.07.2021 г., 23.07.2021 г., прогнозом выбросоопасности методом ЕЭМИ зарегистрировано превышение пороговых значений 27.06.2021 г., 10.07.2021 (2 смена) – за две смены до прогноза базовым методом, 21.07.2021 (2 смена) – за 1,5 суток до прогноза базовым методом.

Не редки случаи, когда повышение параметров ЕЭМИ фиксируется до повышения начальной скорости газовыделения из скважин. Это объясняется тем, что предвестником внезапного выброса является развитие микротрещиноватости под действием давления газа и этот момент электромагнитными методами фиксируется на более ранней стадии в сравнении с базовым методом.

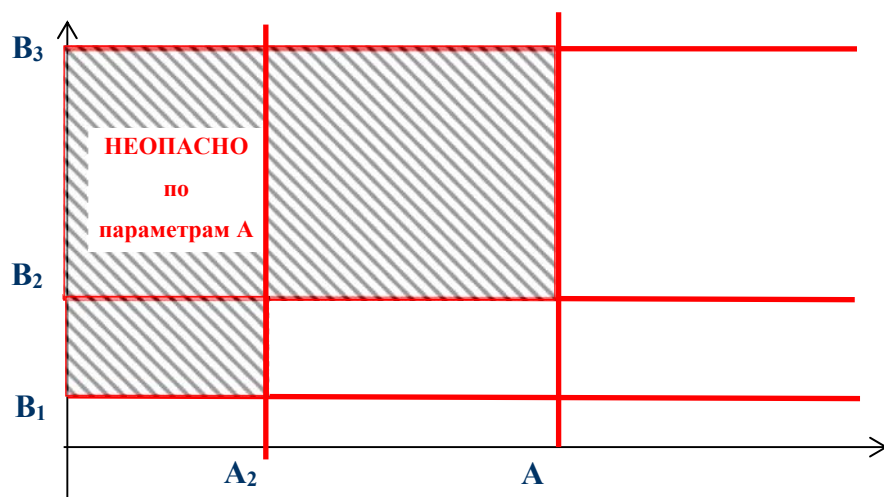


Рисунок 6.4 – Области отнесения к категории «НЕОПАСНО» по прогностическим параметрам  $A$  и  $B$  метода ЕЭМИ

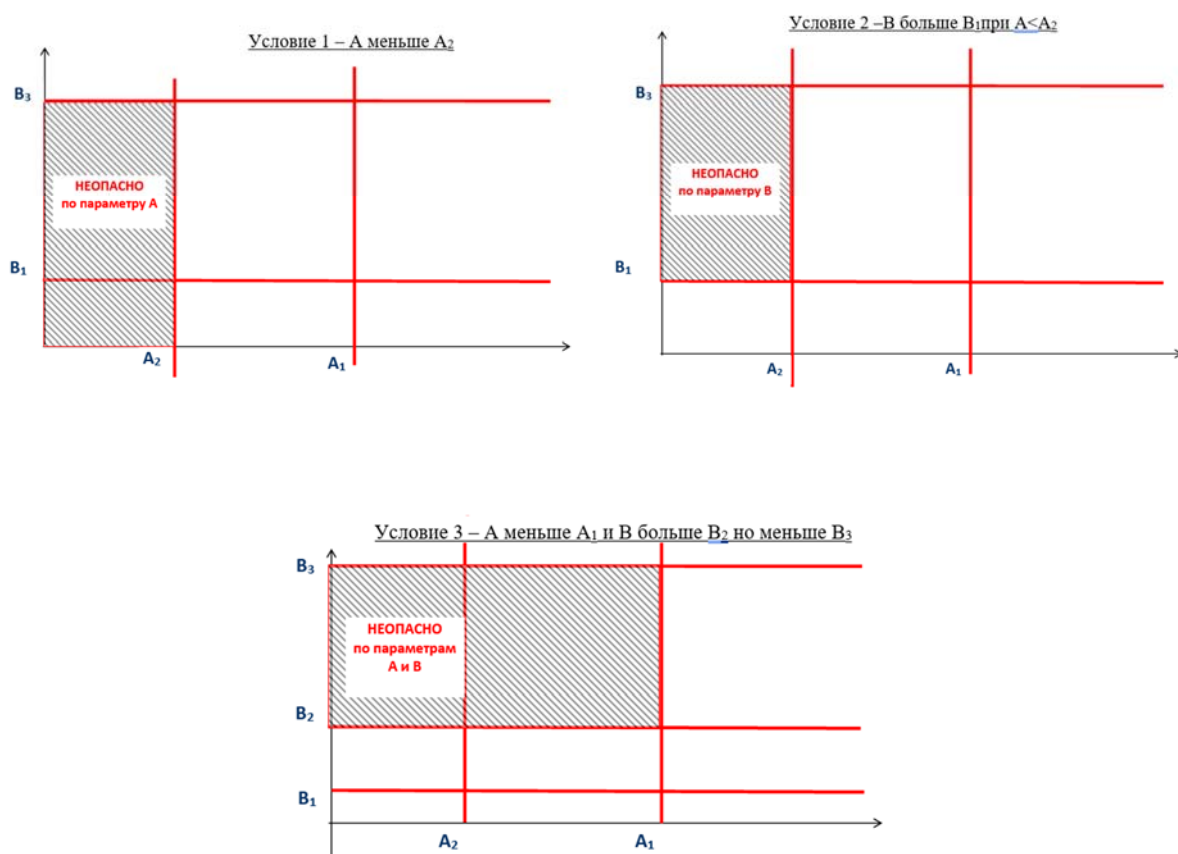


Рисунок 6.5 – Алгоритм отнесения к категории «НЕОПАСНО» по прогностическим параметрам  $A$  и  $B$  метода ЕЭМИ

В течении IV квартала 2021 года на шахтах АО «АрселорМиттал Темиртау» в ходе проведения прогноза выбросоопасности в подготовительных забоях было выполнено 2040 измерений методом ЕЭМИ. Выявленные случаи превышения пороговых значений, установленных для каждой из шахт, не всегда свидетельствуют об опасности внезапных выбросов угля и газа. Присутствует явная корреляция параметров ЕЭМИ с наличием геологических нарушений. Так на шахте шахтах Абайская, им. Ленина, Казахская при проведении горных выработок происходила регистрация повышенного ЕЭМИ при вскрытии структурных нарушений.

При прогнозе выбросоопасности методом ЕЭМИ на шахте Казахская в большом количестве измерений установлено превышение пороговых значений, а именно амплитуда сигнала многократно превышала заданные критериальные значения. Подобного рода регистрация связана с влиянием электромагнитных помех, которые могут генерироваться оборудованием, работающем от электросети, систем позиционирования, питающих кабелей, LED освещения.

В случае обнаружения электромагнитных помех для исключения их влияния измерения проводились с погружением антенны в заранее отбуренный шпур, как показано на рисунке 6.6. Для этого требуется обосновать новые пороговые значения и произвести более точную настройку прибора.

Приведем пример текущего прогноза методом ЕЭМИ на шахте Казахская. Во II квартале 2022 года выполнено 1025 измерений ЕЭМИ. Прогноз проводился в подготовительном забое Конвейерного штрека 342Д6-1-з. Геологический прогноз представлен на рисунке 180. Выкопировка с плана горных работ по пласту Д6 представлена на рисунке 181.

При текущем прогнозе выбросоопасности базовым методом категория ОПАСНО зарегистрирована на следующие даты, представленные в таблице 6.3. Графики изменения параметров ЕЭМИ при проходке Конвейерного штрека 342Д6-1-з за II квартал 2022 представлены на рисунках 6.7-6.9.

Таблица 6.3 – Категория «ОПАСНО» при текущем прогнозе выбросоопасности базовым методом

Дата, смена	Длина выработки, м	Показатели выбросоопасности							Результат контроля эффек-ти
		R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	S <sub>max1</sub>	S <sub>max2</sub>	g <sub>н. max1</sub>	g <sub>н. max2</sub>	g <sub>н. max3 ВПП</sub>	
Конвейерный штрек 342-д6-1-з									
16.03.2022	362,5	-9,36	39,9	3,0	3,5	1,2	>31	1,2	опасно
09.04.2022	421	-10	-10,4	2,8	2,9	0,0	0,0	9,7	опасно
30.05.2022	585.5	-10.4	-9.96	2.9	3.0	0.7	1.0	20.0	опасно

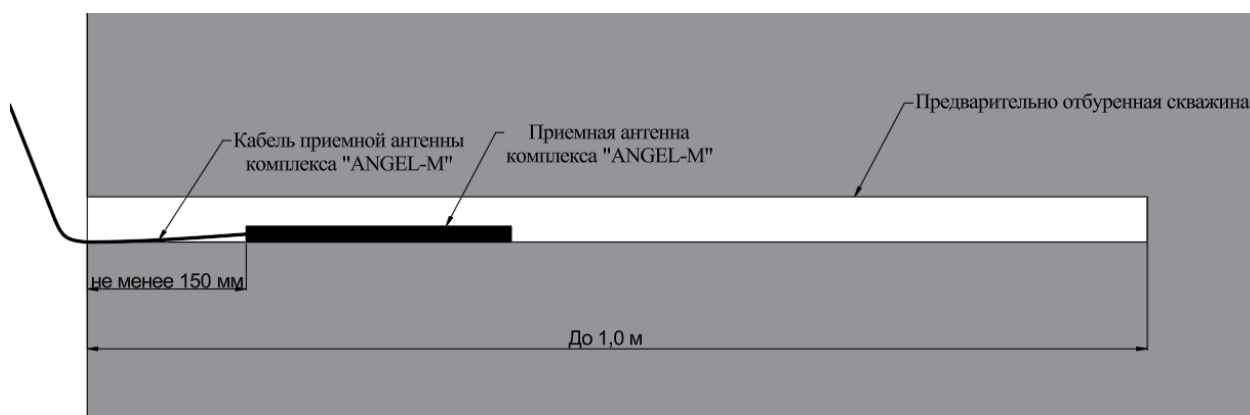


Рисунок 6.6 – Схема расположения приемной антенны комплекса «ANGEL-M» в предварительно отбуренной скважине при проведении прогноза выбросоопасности методом ЕЭМИ

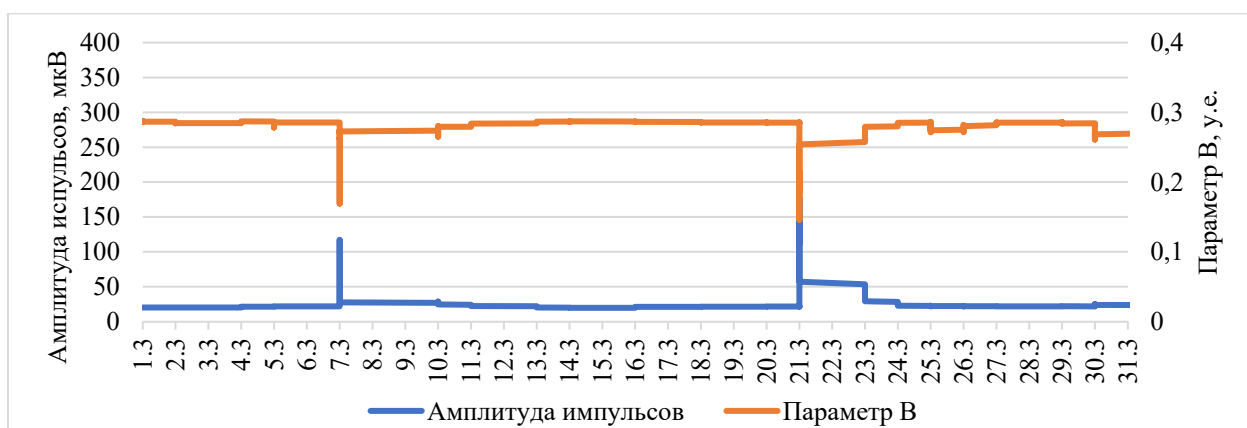


Рисунок 6.7 – График изменения параметров ЕЭМИ в забое Конвейерного штрека 342Д6-1-з при проведении прогноза выбросоопасности в марте 2022

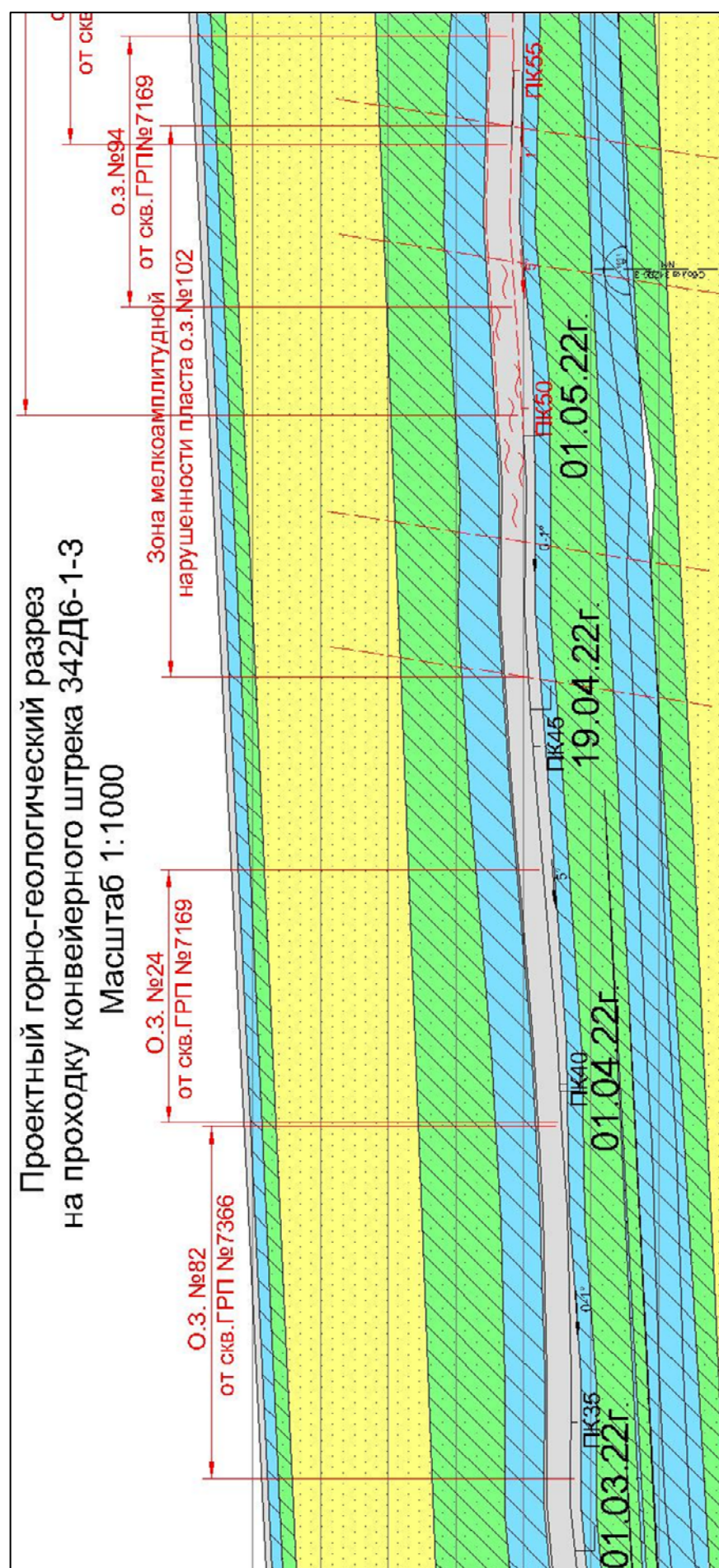


Рисунок 6.8 – Геологический разрез на проходку Конвейерного штрека 342Д6-1-3



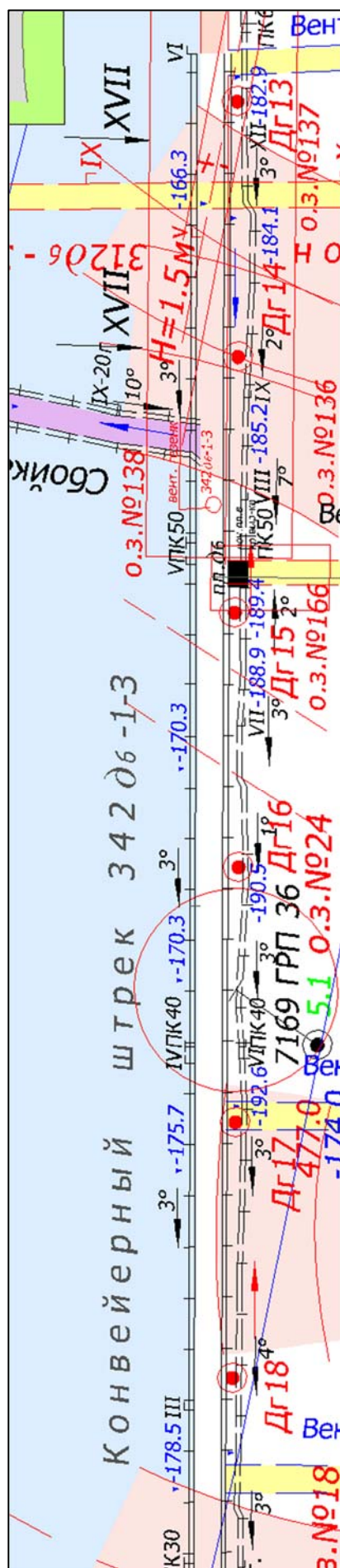


Рисунок 6.9 – Геологический разрез на проходку Конвейерного штреха 342Д6-1-3

Опасные значения зарегистрированы 7 марта при проведении измерений во вторую смену, амплитуда импульсов достигала 143 мкВ, параметр В 0,136 у.е. При прогнозе в третью смену значения ЕЭМИ вышли на показания фоновому уровню. Данный всплеск ЕЭМИ вызван локальным напряженным участком массива горных пород, за счет подсечки горной выработкой в кровле более крепкого пласта аргиллита. При прогнозе базовым методом превышение пороговых значений не выявлено.

На 16 марта по параметрам ЕЭМИ регистрируется фоновое излучение массива горных пород. Тектонических нарушений при проходке горной выработки не обнаружено.

На 21 марта при прогнозе выбросоопасности по параметрам ЕЭМИ регистрируется превышение пороговых значений в третью смену по 12 замерам из 15-ти. Во вторую и четвертую смену наблюдаются фоновые значения. При прогнозе базовым методом категории ОПАСНО не выявлено.

На 2 апреля во вторую смену фиксируются превышение установленных прогностических параметров, по левой части забоя наблюдается наиболее сильный прирост ЕЭМИ амплитуда импульсов увеличилась до 36 мкВ, параметр В до 0,187 центральной части забоя опасные значения параметров ЕЭМИ (рис. 6.10-6.11).

На 8 апреля по левой части забоя в трех измерениях из пяти зарегистрировано превышение установленных пороговых значений. Амплитуда импульсов достигла 58 мкВ, что в два раза превышает фоновые показатели. На 9 апреля при прогнозе выбросоопасности по начальной скорости газовыделения и выходу буровой мелочи установлена категория «ОПАСНО» по шпuru ВПРП (Прогноз и предотвращение внезапных прорывов газа с динамическим разломом почвы выработок).

На 10 апреля в правой и левой частях забоя установлено превышение пороговых значений, причем по правой части забоя превышения фона составляет более чем 20 раз ( $A_{\text{макс}}=670$  мкВ). На 11 апреля прогноз выбросоопасности по параметрам ЕЭМИ не производился.



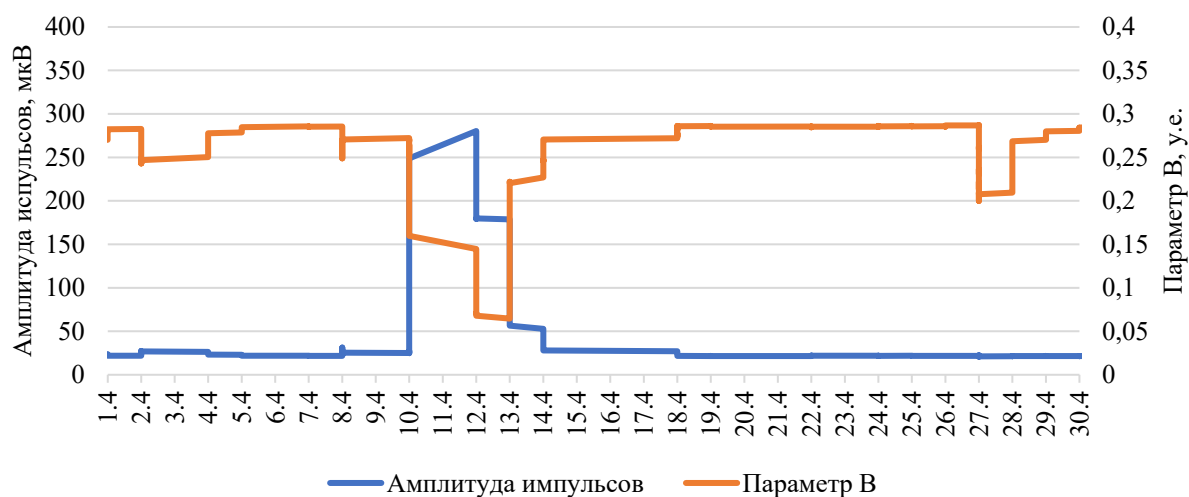


Рисунок 6.10 – График изменения параметров ЕЭМИ  
в забое Конвейерного штрека 342Д6-1-з  
при проведении прогноза выбросоопасности в апреле 2022

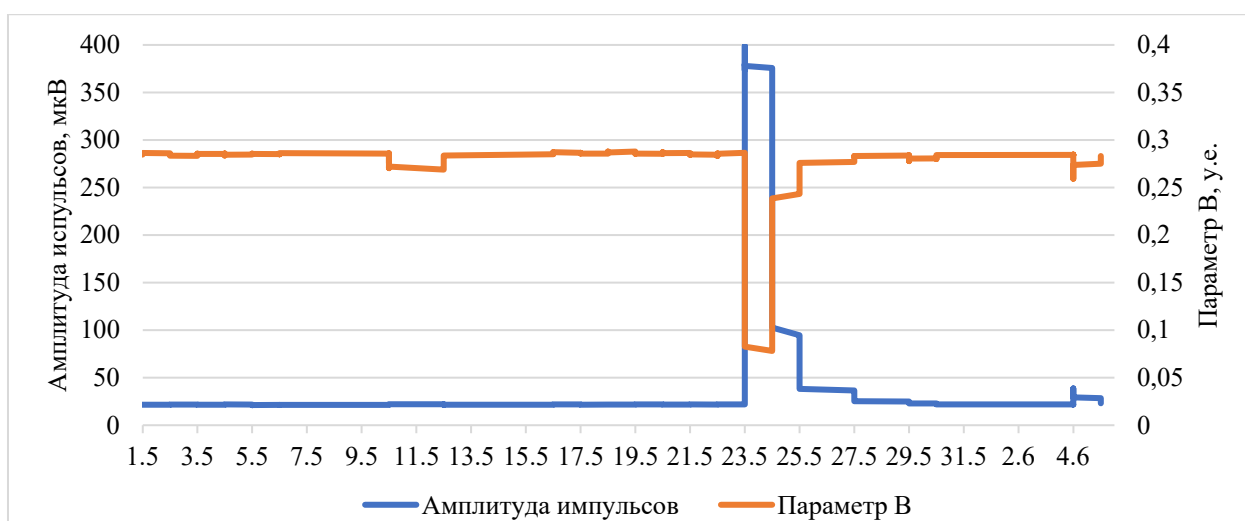


Рисунок 6.11 – График изменения параметров ЕЭМИ  
в забое Конвейерного бремсберга 342Д6-1-з  
при проведении прогноза выбросоопасности в мае-июне 2022

На 12 апреля опасные значения регистрируются по всему сечению забоя ( $A_{ср}=147$ ,  $B_{ср}=0,044$ ), то есть на протяжении 10-12 апреля сохранялась опасная ситуация, свидетельствующая о наличии опасной зоны по внезапным выбросам на данном участке трассы горной выработки.

На 30 мая по параметрам ЕЭМИ зарегистрирован фоновый уровень излучения массива горных пород. На 4 июня при проведении измерений в одном замере установлено превышение пороговых значений. В серии измерений опасная ситуация не подтвердилась. При прогнозе базовым методом категория ОПАСНО не выявлена.

Следует отметить, что с июня 2021 года по июнь 2022 года выполнено 18741 измерение ЕЭМИ на угольных шахтах Республики Казахстан, что позволило сформулировать следующие закономерности и рекомендации для применения данного метода:

1. Методика выполнения серии из 5 измерений в каждой точке на забое выработки позволяет нивелировать погрешность регистрируемого сигнала ЕЭМИ, проявляющуюся в виде единичных замеров, превышающие установленные пороговые значения по параметрам ЕЭМИ. Скорость процессов, происходящих в массиве при формировании выбросоопасной ситуации, по нашему мнению, выше, процессов формирующей удароопасную ситуацию в призабойной части горной выработки. Данное условие требует проведения более частых измерений с периодичностью, позволяющей выявить динамику изменения естественного электромагнитного излучения массива горных пород – не реже 1 раза в смену.

2. Стабильность фонового уровня ЕЭМИ за определенные периоды при проведении горных выработок свидетельствует об отсутствии локальных участков повышенного НДС массива. В случаях приближения подготовительного забоя к передовой выработке, пересечения литотипов горных пород, переезд скрытых нарушений фиксируется данным методом по увеличению электромагнитного излучения, что позволяет за сутки прогнозировать потенциально опасные участки.

3. По причине сложности процессов, происходящих в массиве при формировании выбросоопасной ситуации в краевой части забоя, необходимо проведение дополнительных исследований для выявления корреляции между базовыми методами прогноза выбросоопасности и параметрами ЕЭМИ массива. Во многих случаях оказывает полезной и, даже, необходимой запись ЭМ сигнала для вычисления амплитудно-частотных характеристик. Их анализ позволяет обнаружить и исключить из сигнала (фильтрация) антропогенные электромагнитные помехи, или полностью забраковать замер.

4. В обязательном порядке требуется осуществлять привязку мест проведения измерений ЕЭМИ к плану ведения горных работ и геологическим прогнозам, что в дальнейшем позволит более точно проводить интерпретацию полученных данных.

5. Установленные критериальные значения прогностических параметров позволяют выявлять потенциально опасные участки краевой части углепородного массива. Геофизический комплекс ANGEL-M уверенно показывает наличие скрытых нарушений, при этом аномальные значения проявляются если данное нарушение активно.

### **6.3. Комплексный подход к прогнозу выбросоопасности на рудниках на основе геофизических измерений**

В основу разработки метода прогноза внезапных выбросов породы и газа положены теоретические положения, изложенные в данной работе выше, учитывающие зональность области влияния выработки на НДС массива, понятие об активных и пассивных силах ГДЯ, а также параметры газодинамического состояния массива.

В основе метода лежат зависимости параметров естественного электромагнитного излучения, идущего из массива вследствие изменений его напряженно-деформированного состояния. Данные изменения, как правило, происходят в массиве в результате перераспределения напряжений под давлением

горных пород и заключенного в них газа при воздействии на горный массив проходческого, очистного оборудования и БВР.

Эта зависимость выражается следующей формулой:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = P^2 D, \quad (6.2)$$

где  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  – разность потенциалов между бортами трещины;

$P$  – нагрузка;

$D$  – коэффициент пропорциональности, равный

$$D = \frac{4\pi r^2 U}{\cos \alpha K h}, \quad (6.3)$$

где  $r$  – радиус кривизны силовых линий;

$U$  – величина потенциального поля между бортами трещины;

$\alpha$  – угол раскрытия трещины;

$h$  – ширина раскрытия трещины;

$K$  – коэффициент пропорциональности.

Метод позволяет контролировать напряженно-деформированное состояние горного массива и тем самым осуществлять прогноз его выбросоопасности.

Информация о напряженном состоянии краевых участков пород и в целом горного массива оценивается по регистрируемым параметрам ЕЭМИ при их записи и обработке.

Основными регистрирующими параметрами ЕЭМИ являются амплитуда электромагнитных импульсов и их интенсивность – количество импульсов определенной амплитуды в единицу времени. Между параметрами ЕЭМИ и уровнем действующих в массиве напряжений существует прямая зависимость, что позволяет локализовать выбросоопасные участки.

Объем горных пород, генерирующих ЕЭМИ в местах установки магнитной антенны, ограничен как по длине выработки, так и по расстоянию вглубь массива от стенки выработки. Ограничение по длине выработки определено направлением максимума приема (направлением плоскости витков антенны) вдоль сечения и перпендикулярно направлению выработки. Глубина зондирования определяется зоной опорного давления и ограничена физическими свойствами среды

распространения электромагнитного импульса (плотность, удельное сопротивление и др.). При этом максимум излучения и, соответственно, источник излучения концентрируется в зоне предельно-напряженного состояния массива (угля, породы). Установлено, что зона уверенного прима сигналов электромагнитных импульсов, генерируемых массивом, локализована в пределах  $10 \pm 1$  метра по длине выработки относительно точки установки датчика. Дистанция чувствительности прибора вглубь массива при прогнозе аналогично не превышает 10-12 м. Реализация методики осуществляется с помощью специальной аппаратуры:

- Геофизический комплекс типа ANGEL-M (разработка АО «ВНИМИ»);

- Программа обработки и анализа зарегистрированного сигнала ЕЭМИ.

Методические положения по проведению наблюдений и аппаратное обеспечение геофизических экспресс-методов, основанных на регистрации естественной электромагнитной эмиссии (метод ЕЭМИ), соответствуют требованиям действующей «Инструкции по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений».

Прогноз проводится в следующем порядке:

- в горной выработке устанавливается антенна, с помощью которой в диапазоне частот от 10 Гц до 100 кГц принимаются электромагнитные сигналы, генерируемые электрическими разрядами в трещинах, образующихся при хрупком разрушении массива горных пород;

- с помощью антенны регистрируются параметры вышеуказанных электромагнитных сигналов и определяются показатели ЕЭМИ  $Q_b$  и  $Q_n$ , доля ед.

Показатели  $Q_b$  и  $Q_n$  рассчитываются по формулам [84]:

$$Q_b = \frac{B_{\text{ЕЭМИ}}}{B_{0\text{ЕЭМИ}}}, \quad (6.4)$$

$$Q_n = \frac{N_{\text{ЕЭМИ}}}{N_{0\text{ЕЭМИ}}}, \quad (6.5)$$

где  $B_{\text{ЕЭМИ}}$  – отношение количества импульсов с высокой энергией (амплитудой) к количеству импульсов с низкой энергией (амплитудой) на участке, на котором проводится прогноз методом ЕЭМИ, доля ед.;

$B_{0\text{ЕЭМИ}}$  – отношение количества импульсов с высокой энергией (амплитудой) к количеству импульсов с низкой энергией (амплитудой) на участке, находящемся в неопасном состоянии;

$N_{\text{ЕЭМИ}}$  – количество импульсов заданного уровня энергии (амплитуды) на участке пласта, на котором проводится прогноз выбросоопасности методом ЕЭМИ, доля ед.;

$N_{0\text{ЕЭМИ}}$  – количество импульсов заданного уровня энергии (амплитуды) на участке массива, находящегося в неопасном состоянии.

Участок массива пород, на котором проводится прогноз методом ЕЭМИ, относится к категории «ОПАСНО» при выполнении следующих условий:

$$Q_b > Q_{bk}; \quad (6.6)$$

$$Q_n > Q_{nk}; \quad (6.7)$$

где  $Q_{bk}$  и  $Q_{nk}$  – пороговые значения прогностических параметров ЕЭМИ.

Порядок проведения прогноза выбросоопасности **методом дипольного электромагнитного зондирования** следующий:

- в горной выработке устанавливается излучатель, подключенный к генератору токов;
- через интервалы 0,5-1 м на участке горной выработки длиной 10-15 м приемной антенной, подключенной к геофизической аппаратуре, определяется амплитуда искусственного электромагнитного поля  $A_{\text{ЭМП}}$ , мВ, наведенного в горном массиве;
- результаты замеров представляются в виде зависимости

$$A_{\text{ЭМП}} = f \cdot (R_{\text{ЭМП}}), \quad (6.8)$$

где  $R_{\text{ЭМП}}$  – расстояние от приемной антенны до излучателя, м, по которому устанавливаются:

– ширина участка горного массива, на котором произошли необратимые изменения свойств пород  $X_{\text{уч.изм.св}}$ , м;

– расстояние от горной выработки до максимума опорного давления  $X_{\text{оп.дав}}$ , м;

– коэффициент, характеризующий изменение электрического сопротивления в зоне опорного давления  $K$ , который определяется по формуле:

$$K = \frac{S_n}{S_m}, \quad (6.9)$$

где  $S_n$  – электрическое сопротивление массива пород вне зоны опорного давления, Ом;

$S_m$  – электрическое сопротивление массива пород в зоне опорного давления, Ом.

Породный массив находится в неопасном состоянии при  $X_{\text{уч.изм.св}} \geq n$ .

При  $X_{\text{уч.изм.св}} < n$  для определения выбросоопасности массива пород дополнительно определяется показатель опасности, зависящий от его мощности или его вынимаемого слоя  $Q_s$ , доля ед., по формуле:

$$Q_s = \frac{K}{2,4 \exp(0,2 \cdot \frac{X_{\text{оп.дав}}}{m})}, \quad (6.10)$$

Основными преимуществами данного метода являются малая трудоемкость и высокая технологичность, обусловленная возможностью приема сигналов с помощью антенны без контакта с массивом.

На основе результатов исследований комплексом ANGEL-M в условиях рудника «Интернациональный» АК «АЛРОСА» установлены пороговые значения прогностических параметров (критерии) геофизического электромагнитного метода прогноза выбросоопасности участков горного массива, основанного на изменении и регистрации параметров естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ).

Практика эксплуатации прибора показала, что измерения следует проводить в течении первых 5 часов после завершения БВР. Данный временной интервал выбран для фиксации пиковых значений интенсивности ЕЭМИ, обусловленных активными процессами разрушения массива в период его интенсивной нагрузки. Кроме этого, для получения более достоверных результатов необходимо замеры проводить в условиях отсутствия каких-либо внешних помех, например, использование лампы освещения без датчика системы слежения СПГТ- 41, отключение шахтного освещения после БВР, не использование датчика АГК непосредственно в забое горной выработки, осуществление контроля концентрации вредных газов переносным газоанализатором.

**Физическая основа метода прогноза выбросоопасности по регистрации вынужденной и естественной сейсмоакустической активности** заключается в зависимости акустических показателей горных пород (скорости распространения упругих волн, коэффициента затухания и др.) от изменения физико-механических свойств и напряжений в массиве, происходящих в результате наложения естественных (тектонических) и искусственных (техногенных) полей напряжений.

На практике для оценки напряженного состояния массива метод по регистрации вынужденной и естественной сейсмоакустической активности с помощью аппаратного комплекса ANGEL-M реализуется в двух вариантах.

Первый вариант (пассивный) основан на регистрации естественной акустической эмиссии, уровень которой напрямую зависит от концентрации нагрузок в зонах действия переменного поля напряжения, газового фактора и других горно-геологических и горнотехнических условий.

Второй вариант (активный) базируется на изучении искусственных сейсмических полей, образование которых обусловлено воздействием на массив бурового и (или) ударного инструмента, приложением вибрационных нагрузок от добычных или проходческих машин и механизмов.

По существу, пассивный метод (ЕАЭ) позволяет контролировать процессы хрупкого разрушения горных пород массива в результате его



деформирования под действием горного давления, как в области опорного давления в зоне концентрации максимальных нагрузок, так и в зоне разгрузки посредством регистрации упругих сейсмоакустических импульсов, от возникающих в массиве макро и микротрещин. В режиме постоянного контроля данный вариант метода весьма эффективен, достаточно представительен и позволяет получить обобщенную оценку состояния значительного объема горных пород по степени их напряженности.

Метод по регистрации вынужденной и естественной сейсмоакустической эмиссии позволяет оценить НДС массива по изменению динамического и частотного диапазона сейсмоакустических импульсов, возникающих в массиве при вибрационном и (или) ударном воздействии. Предполагается, что в зонах повышенных опорных нагрузок вызванная сейсмоакустическая эмиссия достигает своего максимума. Однако, при локальном прогнозе данным методом информация о состоянии массива является достоверной только на момент проведения прогноза в силу того, что НДС массива по мере ведения горных работ постоянно изменяется.

АЭ в породном массиве генерируется в результате динамического роста и схлопывания трещин различного иерархического уровня (от микро- до макродефектов). В качестве основных регистрируемых параметров аппаратного комплекса ANGEL-M с геофоном приняты амплитуда сейсмоакустических импульсов и их интенсивность – количество импульсов определенной амплитуды в единицу времени. Как и для метода ЕЭМИ между параметрами АЭ (их численными показателями) и уровнем действующих в массиве напряжений существует прямая зависимость, позволяющая оценивать степень их выбросоопасности количественно.

В основе алгоритма оценки выбросоопасности в данной методике лежит зависимость активности сигналов ЕАЭ и их амплитудных уровней, которая описывается фундаментальным законом Гутенберга - Рихтера (рис. 6.12).

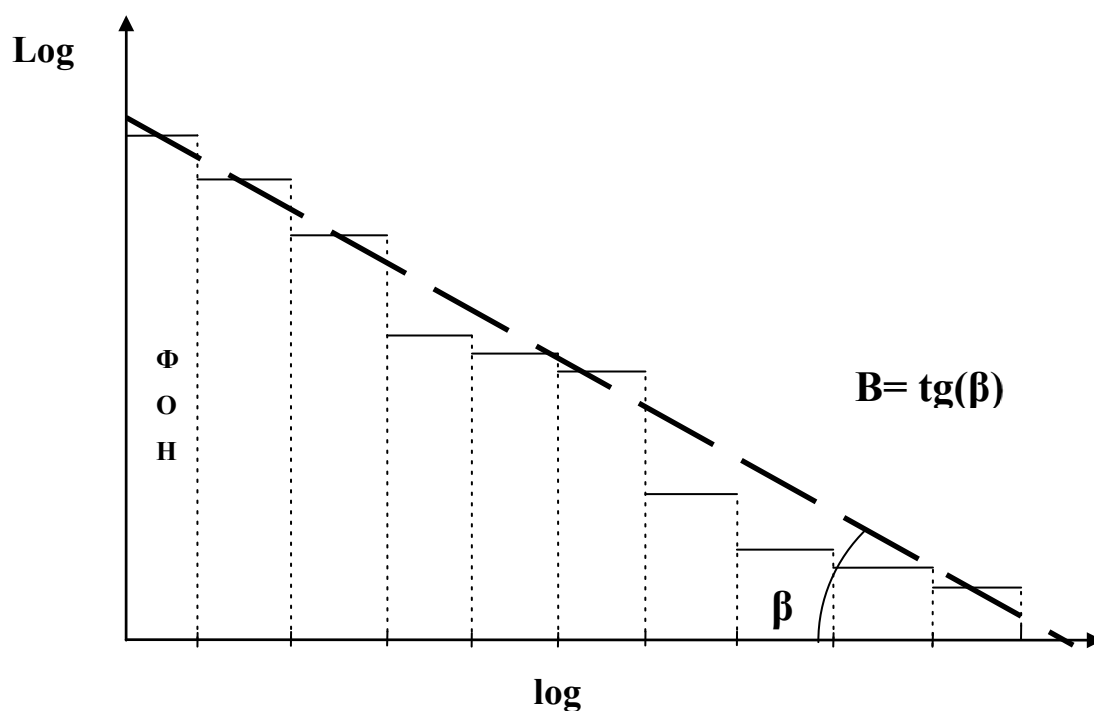


Рисунок 6.12 – Зависимость активности сигналов ЕАЭ и их амплитудных уровней (пример распределения их числа  $N$  по 10-ти амплитудным уровням)

Прогноз выбросоопасности горных пород состоит в оценке нескольких параметров ЕАЭ по методикам, учитывающим особенности конкретного рудника, и сравнении их с установленными критериями. Оценка осуществляется на основе краткосрочной регистрации ЕАЭ без какого-либо дополнительного воздействия на массив [94].

Минимальные значения параметра «В» свидетельствуют о преобладании высокоамплитудных импульсов в структуре акустической эмиссии поскольку генерация мощных сигналов (высокий параметра «А») обусловлена развитием крупных дефектов, снижение коэффициента «В» интерпретируется как признак коалесценции. Это указывает на переход процесса дезинтеграции на более высокий иерархический уровень с последующим формированием магистральных трещин и макроразрушением массива.

Оценка степени выбросоопасности выполняется сравнением результатов выполненных замеров с пороговыми значениями прогностических параметров (далее критериями) выбросоопасности.

Для постоянного уточнения и поддержания в актуальном состоянии базы данных пороговых значений прогностических параметров, при прогнозе выбросоопасности методом ЕАЭ с применением комплекса ANGEL-M в призабойном пространстве, производится бурение контрольных скважин для прогноза выбросоопасности базовым методом.

***В основе метода прогноза выбросоопасности по искусственно наведенным электромагнитным полям (ВЭМИ) лежит зависимость параметров электромагнитных волн, прошедших через массив, от удельного электрического сопротивления горных пород, изменяющегося под действием различных геомеханических факторов: напряжений, трещиноватости и плотности пород, их минерального состава, влажности и т.п.***

Возбуждение и прием гармонически изменяющегося электромагнитного поля проводится при помощи незаземленных контуров – магнитных диполей (антенн), расположенных в контуре выработке.

Первичное и вторичное (за счет вихревых токов в массиве) магнитные поля индуцируют ЭДС в приемной антенне, величина которой зависит от расстояния между излучателем и приемником ( $r$ ), частоты ( $f$ ) и удельной электропроводности среды (эффективного электрического сопротивления).

Производимые в массиве электрометрические измерения позволяют установить величину эффективного электрического сопротивления, представляющего собой обобщенную электрическую характеристику неоднородного по электрическим свойствам массива горных пород. Регистрируемые прибором характеристики электрических сигналов представляют собой многофакторные параметры, зависящие от свойств и состояния массива, но и от геометрии расположения электродов (антенн), размеров и конфигурации горных выработок. В общем виде функция эффективного сопротивления представляется выражением:

$$\rho = \frac{\Delta U}{J} KC(l, r, a, z), \quad (3.12)$$

где  $\Delta U$  – разность потенциалов между приемными электродами либо уровень регистрируемого сигнала в приемных антеннах;

$J$  – сила тока, протекающего в массиве;

$K$  – коэффициент, учитывающий геометрические размеры и конфигурацию установки (величину и направление разноса питающих и приемных электродов или антенн).

Для мониторинга геомеханического состояния призабойной части массива формируется переменное электромагнитное поле на частоте 500 кГц. Измерения выполняются последовательно в трех ортогональных плоскостях (XY, YZ, ZX) путем соответствующей ориентации излучающей рамочной и приемной антенн: вдоль бортов выработки, перпендикулярно им и в горизонтальной плоскости. В моменты генерации импульсов приемное устройство фиксирует амплитуду сигнала, прошедшего через исследуемый массив.

По значению параметра  $F$  оценивается, в зависимости от локализации и направления измерения [234], либо напряженное состояние массива, либо структурное состояние (трещиноватость). На рисунках 6.13 и 6.14 приведены правила интерпретации наблюдаемых числовых значений.

0,11	Опасные напряжения массива
0,17	Повышенные напряжения массива
0,53	Нормальное состояние массива
1,24	Трещиноватое состояние массива

Рисунок 6.13 – Правила оценивания напряженного состояния массива

0,11	плотные структуры
0,2	плотные структуры вмещающих пород
0,3	область упругого деформирования массива, нормальное состояние вмещающих пород
0,9	область фильтрационной неустойчивости вмещающих пород
1	трещиноватое состояние массива( вмещающих пород) (область разуплотнения)
1,5	повышенная трещиноватость массива (область отжима)

Рисунок 6.14 – Правила оценивания структурного состояния массива

Установлено [48], что наиболее сильно показатель  $F$  коррелирует с величинами вертикальных напряжений, поэтому его рекомендуется использовать преимущественно для локального прогноза при ведении горных работ в удароопасных ГГУ.

#### **6.4. Проведение опытно-промышленных испытаний комплексного подхода к прогнозу выбросоопасности в сочетании с БВР**

Опытно-промышленные испытания (ОПИ) разработанного комплекса мер по прогнозу газодинамических явлений (ГДЯ) выполнялись на руднике «Интернациональный» Мирнинско-Нюрбинского ГОК АК «АЛРОСА»

В качестве объектов для проведения испытаний были выбраны:

1. Слойной заезд № 6 эксплуатационного блока № 11.
2. Слойной заезд № 28 эксплуатационного блока № 11.
3. Закладочный орт № 23.

Отдельные замеры выполнены и в других выработках. Их наименования приведены далее по тексту.

Во время проведения испытаний происходили внезапные выбросы породы и газа в автоуклоне, что подтвердило реальную опасность по газодинамическим явлениям участка, где проводились ОПИ.

Проведение автоуклона на период ОПИ велась в особо сложных горно-геологических условий в зоне влияния крупно- и мелкоамплитудных нарушений (рисунок 180). Автоуклоном вскрывался пласт № 13, расположенный в почве выработки и представленный коричневыми битуминозными доломитами, мелкозернистыми, массивными с натечными проявлениями. В кровле выработки залегает пласт № 12, сложенный бежевыми тонко-мелкозернистыми битуминозными доломитами волнисто-слоистой текстуры с кремнистыми и ангидритовыми включениями.

В данной выработке 26.04.2022 г. (отм. -875 м) зарегистрировано ГДЯ, произошедшее после БВР по торпедированию горного массива (рис. 6.15). Пласт 13 отнесен к особовыбросоопасным. Мощность пласта составляет 4,7 м.

В центральной и верхней частях сечения автоуклона залегает экранирующий слой глинистых зеленовато-серых мелкослоистых доломитов средней трещиноватости. При расследовании явления зафиксированы следующие отличительные признаки газодинамического явления:

- породный массив разрушен за контуром выработки (рис. 6.16-6.17);
- отброшенная горная масса расположилась под углом меньше угла естественного откоса, что говорит о существенной работе газа в процессе ГДЯ;
- в разброшенной горной массе с кусковатым мелко- и крупнообломочным материалом присутствуют плитки мелкой и очень тонкой величины, а также расслоение и шелушение на стенках выбросоопасного слоя № 13;
- в границах особо выбросоопасного слоя № 13 образовалась опережающая полость с взрыхленной горной породой с выходом за контур сечения выработки;

Как особые признаки ГДЯ выделяются наличие мелкоамплитудной нарушенности массива с перегибом слоев породы в сторону кровли выработки и распространение опережающей полости выброса с взрыхленной горной породой ниже почвы выработки на 1,4 м на глубину 7,3 м.

После ГДЯ максимальная метанообильность составила 18,3%. Процесс снижения содержания газа в забое автоуклона до нормативного уровня в 0,5% занял 70 минут с момента запуска главной вентиляционной установки. Это на 40 мин превысило нормативное время, предусмотренное «Рабочей инструкцией по сотрясательному взрыванию автоуклона блока 11».

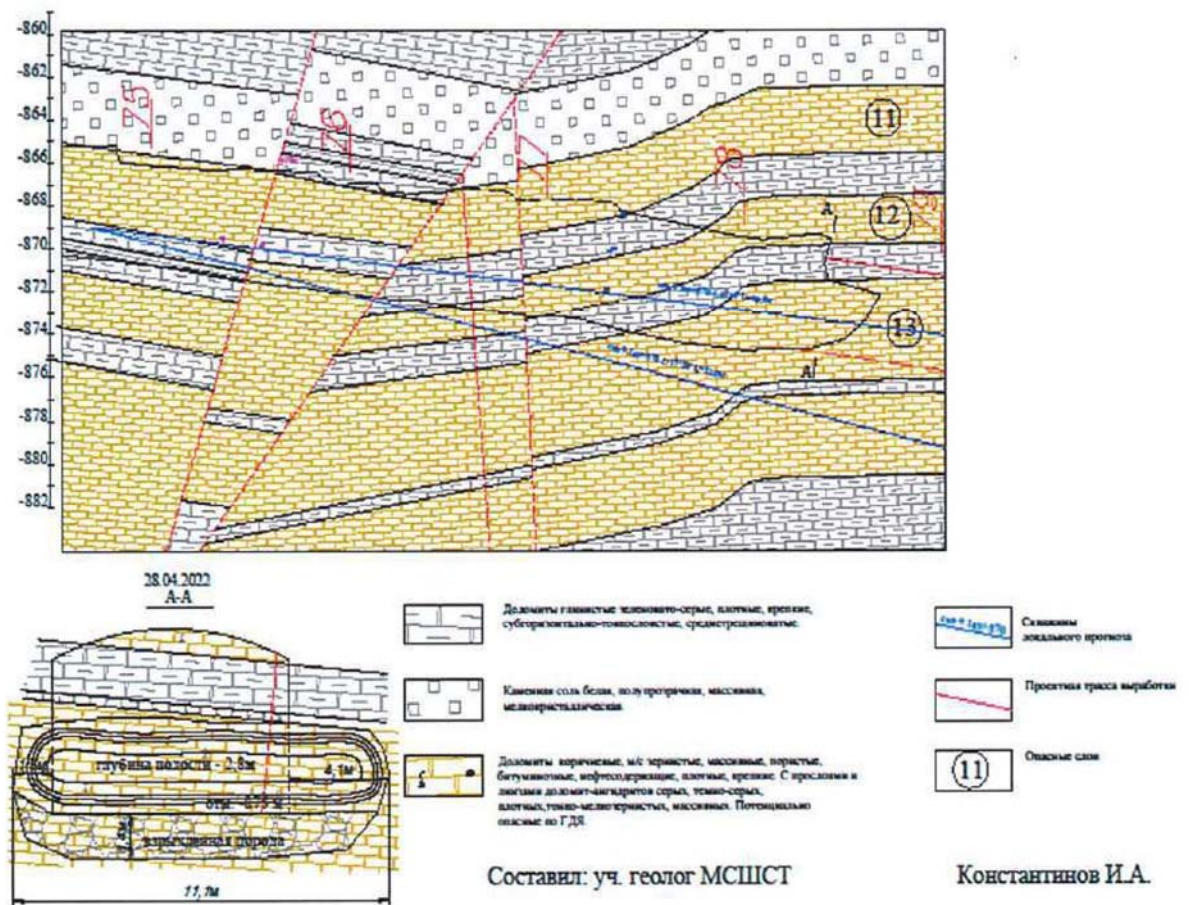


Рисунок 6.15 – Геологический разрез по трассе автоуклона

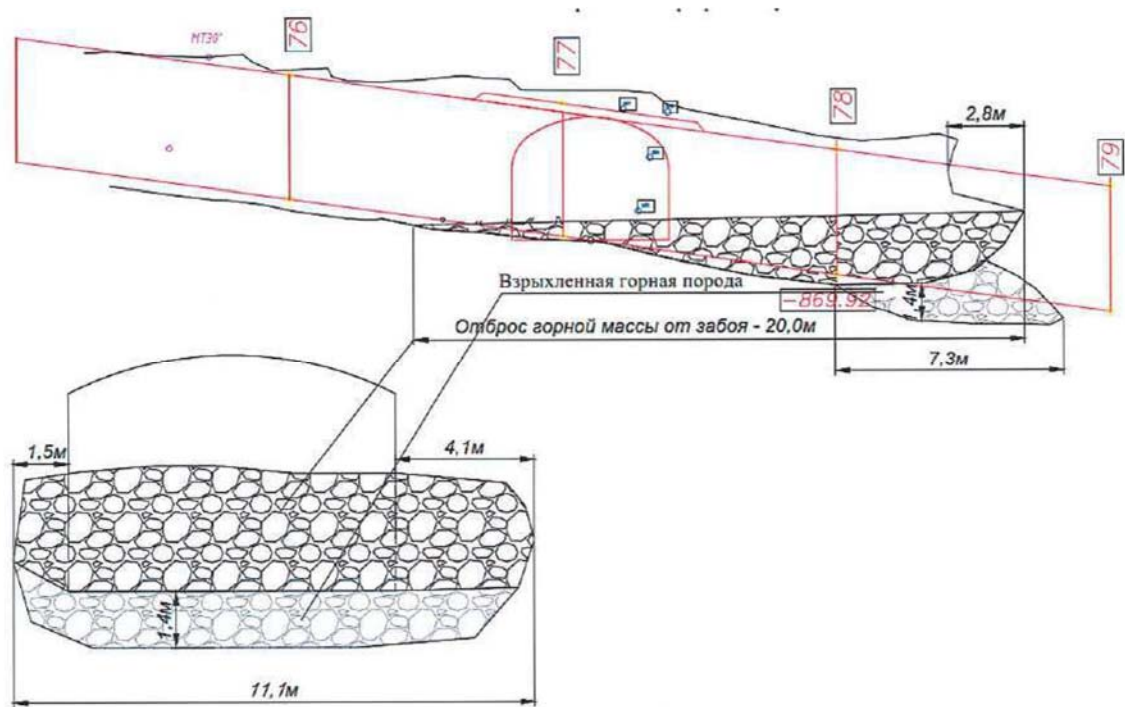


Рисунок 6.16 – Эскиз забойного участка выработки после внезапного выброса породы и газа 26.04.2022



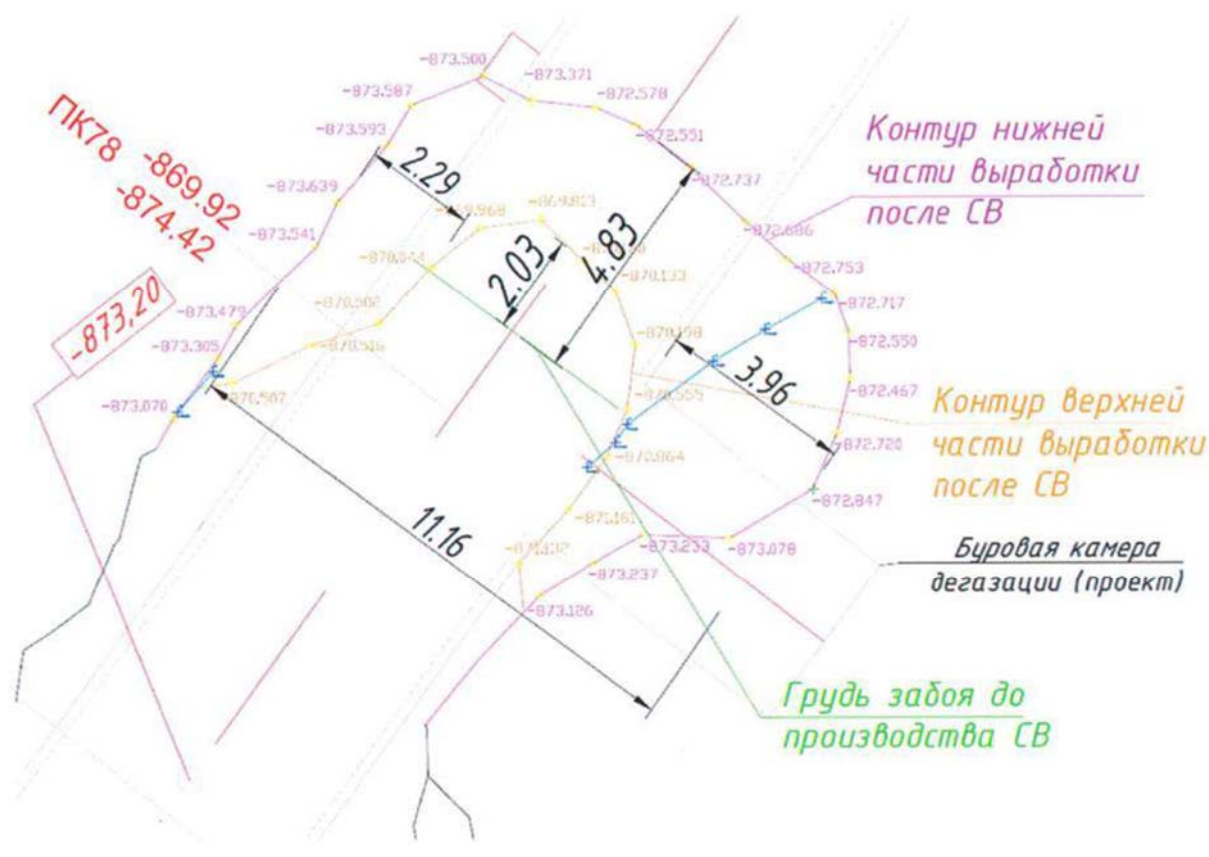


Рисунок 6.17 – Эскиз забойной части выработки после внезапного выброса породы и газа  
26.04.2022

За период разгазирования среднее содержание метана составило 3,8 %, средняя скорость струи в выработке - 0,35 м/сек. Объем выделившегося газа за 70 мин составил 1653,4 м<sup>3</sup>. При расследовании ГДЯ установлены размеры опережающей полости по ширине – 11,0 м, по высоте – 2,5 м и вглубь массива – на 2,8 м.

Спустя полмесяца, 11.05.2022 г., в забое автоуклона произошел еще один внезапный выброс (отм. -875 м). Объем выброшенной горной массы составил ориентировочно 500-800 м<sup>3</sup> (1300-2080 т).

Концентрация метана в забое на пике достигала 28 %. Полость внезапного выброса имела ширину 7-8 м, высоту – 3,5 м, глубину – 6,3 м.

Отбитая горная масса состояла из кусковатого, среднекрупнообломочного материала с присутствием крупногабаритных кусков породы размером 1-3,6 м и мелкой фракции.



По результатам проведения испытаний составлен и подписан в установленном порядке «Акт опытно-промышленных испытаний комплекса мер по прогнозу и предупреждению газодинамических явлений (ГДЯ) на руднике «Интернациональный» Мирнинско-Нюрбинского ГОК АК «АЛРОСА» (ПАО)» от 06.06.2022 и составлен протокол испытаний от 07.06.2022.

При проведении опытно-промышленных испытаний (ОПИ) комплекса были получены следующие результаты.

### **1. Испытан метод текущего прогноза выбросоопасности по газодинамическим характеристикам горного массива.**

Испытания метода проведены в слоевом заезде № 6 эксплуатационного блока № 11 и закладочном орте № 23. Согласно «Временной методике ...» для прямой оценки опасности при текущем прогнозе выбросоопасности применялась максимальная начальная скорость газовыделения  $g_{н.мах}$ .

В результате испытаний подтвержден установленный ранее при проведении экспериментальных исследований критерий выбросоопасности по указанному показателю из метровых интервалов контрольного шпура длиной 1 м, пробуренного по потенциально выбросоопасному слою пород из забоя горной выработки. Для выбросоопасных зон значение  $g_{н.мах} \geq 4$  л/мин. При получении данного критерия прогнозируемая зона должна быть приведена в невыбросоопасное состояние применением локального способа предотвращения ГДЯ.

По результатам бурения контрольных шпуров для прогноза выбросоопасных зон и контроля эффективности противовыбросных мероприятий при проведении горных выработок установлено, что интервал с максимальным значением начальной скорости газовыделения располагается на глубине не более 4,5 м. Исходя из этого результата, длина контрольных шпуров для прогноза и контроля выбросоопасности принята равной этой глубине.

Учитывая величину необходимого неснижаемого опережения, составляющую не менее 1 м, текущий прогноз при получении неопасного значения показателя выбросоопасности должен повторяться не более чем через 3,5 м подвигания.

## **2. Испытана аппаратура аэрогазового контроля «Микон-III» как инструмент дополнительной оценки опасности зон впереди забоев горных выработок по внезапным выбросам породы и газа.**

Об этой опасности могут свидетельствовать повышенные показания  $\text{CH}_4$  по сравнению с фоновыми значениями, зафиксированные датчиками ДМС аппаратуры «Микон-III» во время буровых и выемочных работ.

Текущий прогноз выбросоопасности с применением аппаратуры газовой защиты рекомендуется выполнять параллельно с прогнозом по газодинамическим характеристикам пласта.

В настоящее время не установлено возможности прогнозирования выбросоопасных зон данным методом. Однако, при регистрации аномальных всплесков метана при выемке пород забой должен быть остановлен (по «Инструкции ...»), и должен быть выполнен внеочередной текущий прогноз выбросоопасности по показателю  $g_{n,max}$ . Для реализации прогноза должны быть установлены датчики концентрации метана и расхода воздуха на одинаковом удалении от забоя (30-50 м), подключены к системе аэрогазового контроля. Как было сказано выше, интерес к таким испытаниям был вызван возможностью полной автоматизации прогноза выбросоопасности.

## **3. Испытан геофизический метод прогноза – каротаж скважин методом ЕЭМИ.**

Установлено, что его целесообразно применять в дополнение к методу текущего прогноза выбросоопасности по газодинамическим характеристикам.

При использовании каротажа скважин методом ЕЭМИ вначале производится верификация критического значения показателя выбросоопасности, используемого в данном методе, по показателю  $g_{n,max}$ . А затем метод может использоваться как дополнительный при текущем прогнозе выбросоопасности.

Как элемент автоматизации прогноза ГДЯ на предприятии внедрен программный продукт, позволяющий после каждого цикла измерений архивировать полученные значения в базу данных, для последующего анализа измерений.

Специалистами службы ППДЯ для анализа была передана база данных с измерениями, выполненными в условиях рудника начиная с 14.08.2020. Общее количество шахтных наблюдений составило более 2400 замеров.

Измерения проводились в подготовительных забоях следующих выработок эксплуатационного блока № 11:

Автоуклон, спиральный съезд, закладочный орт №4, подходная выработка на закладные скважины, слоевой заезд № 1, ниша контроля метана КЭВ, слоевой заезд № 7, слоевой заезд № 29, слоевой заезд № 22.

Наибольшая выбросоопасность в период проведения испытаний была отмечена в автоуклоне. При применении геофизических методов вначале производится верификация применяемых в конкретном методе критических значений для оценки выбросоопасности по показателю  $g_{н.тах}$ . А затем метод может использоваться как дополнительный при текущем прогнозе выбросоопасности.

В ходе ОПИ в условиях подземного рудника «Интернациональный» была проведена наработка значений прогностических параметров выбросоопасности для геофизического комплекса ANGEL-M. Значения прогностических параметров представлены выше в п. 3.6.

В таблице 6.4 используются следующие величины:

1. Параметр  $A_1$  – максимальная амплитуда импульсов в цикле измерения;
2. Параметр  $A_2$  – минимальная амплитуда импульсов в цикле измерения;
3. Параметр  $B_1 (\text{tg } \alpha)$  – минимальное значение угла наклона прямой распределения.

4. Параметр  $B_2 (\text{tg } \alpha)$  – максимальное значение угла наклона прямой распределения.

5. Параметр  $B_3 (\text{tg } \alpha)$  – максимальное значение параметра  $B$ , при которой фиксируется состояние «ПОМЕХА».

6. Схематически область, которая отнесена к категории «НЕОПАСНО», показана на рисунке 6.18. Значения, которые не попадают в диапазон, указанный в схеме, должны быть отнесены к категории «ОПАСНО».

Таблица 6.4 – Установленные диапазоны значений прогностических параметров и соответствующие категории выбросоопасности в условиях рудника «Интернациональный»

Наименование прогностического параметра		Обозначение	Пороговые значения
Минимальная амплитуда импульсов в цикле измерения;		A2	23 мкВ
Максимальная амплитуда импульсов в цикле измерения;		A1	56 мкВ
Минимальное значение параметра В		B1	0,170
Промежуточное значение параметра В		B2	0,200
Максимальное значение параметра В		B3	0,4
Критерии выбросоопасности	Диапазоны значений прогностических параметров ЕЭМИ и соответствующие им категории ВЫБРОСООПАСНОСТИ		
условие 1	$0,4 > B \geq 0,170$ и $A \leq 23$ мкВ	$A > 56$ мкВ	
условие 2	$0,4 > B \geq 0,200$ и $A \leq 56$ мкВ	$B < 0,170$	
условие 3		$B < 0,200$ и $A > 23$ мкВ	
категория	НЕ ОПАСНО	ОПАСНО. Требуется подтверждение базовым (альтернативным методом)	

Было выполнено профилирование тупиковой части выработки до передового торпедирования, начиная от сопряжения до забоя (МТ 28 отход 14,54 м). По данным профилирования отмечен закономерный рост

напряжений в массиве при подходе к сопряжению. В призабойной части повышенного уровня ЕЭМИ не наблюдается.

По результатам шахтных испытаний методики прогноза установлено, что положение участков опасных по проявлению ГДЯ достоверно определяется по изменению амплитуды электромагнитных импульсов (рис. 6.19). 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  $A_{\phi}$ .

Далее производился прогноз выбросоопасности перед каждым циклом отбойки горной массы. 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 на 3-7 м опасной по проявлению внезапных выбросов пород и газа (рис. 6.20).

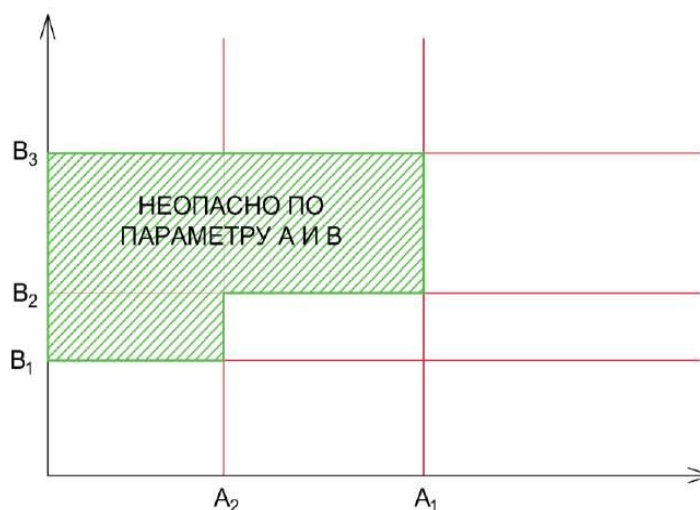


Рисунок 6.18 – Области отнесения к категории «НЕОПАСНО» по прогностическим параметрам  $A$  и  $B$  метода ЕЭМИ

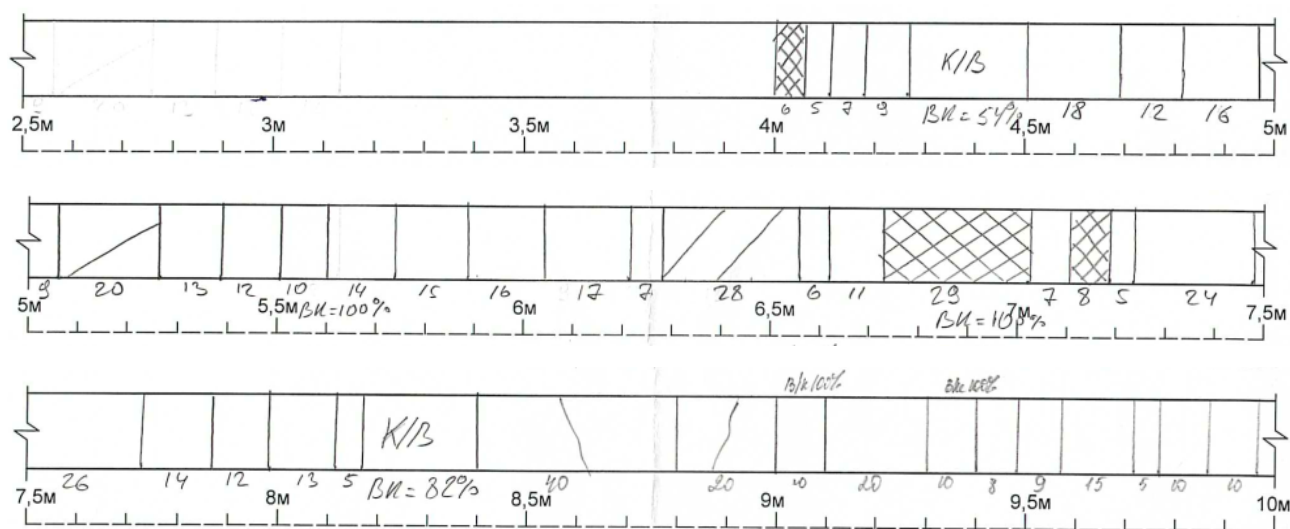


Рисунок 6.19 – Сопоставление результатов замеров методом ЕЭМИ с результатами дискования керна по скв. сз28/лп1

В настоящее время данный подход активно применяется ВНИМИ при работе с угольными и рудными добывающими предприятиями. В приложении 4 приведены примеры актов экспертиз, выполняемых с использованием данного подхода.

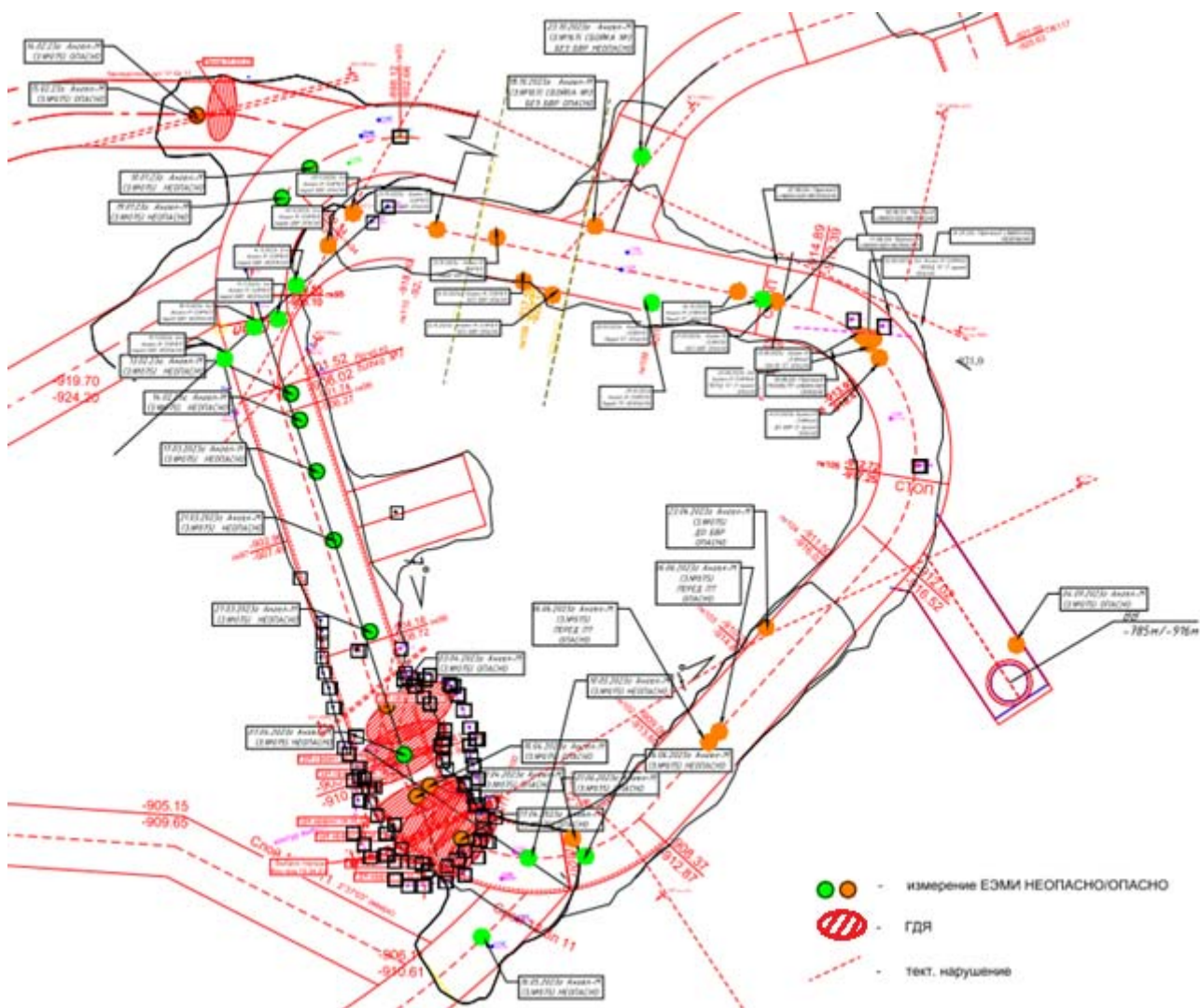


Рисунок 6.20 – Результаты прогноза выбросоопасности методом зондирования забоя по ЕЭМИ и проявление ГДЯ

## 6.5 Анализ результатов замеров ЕЭМИ на угольных месторождениях и на рудниках

По результатам ОПИ временной методики для прогноза выбросоопасности массива были приняты два геофизических метода: каротаж передовой разведочной скважины методом ЕЭМИ и зондирование забоя выработки методом ЕЭМИ.

Накопленный массив данных при контроле выбросоопасности на горнодобывающих предприятиях предоставил возможность провести

сравнительный анализ глобальных особенностей ЕЭМИ по основным типам месторождений: рудники и угольные шахты.

Анализ строился, исходя из следующих условий:

- в данной работе измерительный комплекс «Ангел-М» и сопровождающая его методика оценки выбросоопасности используются как опробованный, сертифицированный инструмент и, следовательно, не подвергаются ревизии;

- в теоретических основах метода ЕЭМИ установлено, что структура сигналов и их интегральные показатели связаны с локальными геологическими особенностями и НДС массива косвенно, и потому для корректной оценки выбросоопасности в конкретных условиях требуется уточнение зон безопасных значений показателей  $A$  и  $B$  прямыми методами – бурение контрольных скважин, исследование дискования керна, оценка скорости начального газовыделения;

- существенную проблему для измерения ЕЭМИ в выработках создают антропогенные помехи – радиосвязь, освещение, силовые линии, работа электроборудования, поэтому весь доступный массив наблюдений необходимо тщательно цензурировать по наличию в описании замеров этих источников.

При сравнении особенностей ЕЭМИ на угольных шахтах и рудниках использовались следующие априорные сведения о свойствах пород:

- многочисленные полевые и лабораторные эксперименты по исследованию ЕЭМИ при разрушении горных пород показывают, что в твердых крепких горных породах источниками ЭМИ являются пьезоэффект, трение поверхностей трещин (трибоэлектричество) и движение заряженных дислокаций под нагрузкой, в то время как в рыхлых осадочных породах – электрохимические процессы в микропленочной влаге, трение между зернами и перераспределение поровых флюидов;

- принципиальные отличия физической основы ЕЭМИ в различных породах приводит к тому, что в твердых крепких горных породах



генерируются короткие импульсы (микросекунды–миллисекунды), связанные с фактами раскалывания, порождающие импульсы в широком высокочастотном диапазоне 1 кГц –1 МГц, амплитуда которых резко (в 2 и более раз) возрастает в момент макроразрушения, в то время как в рыхлых осадочных породах наблюдаются длительные флуктуации ЭМИ (секунды–минуты) в относительно узком низкочастотном диапазоне 0,1–100 Гц, которые слабо изменяются по амплитуде и часто неотличимы от фона;

- для осадочных пород важным фактором является влажность, с ее ростом амплитуда ЕЭМИ растет за счет более свободного движения ионов, в то время как в твердых породах амплитуда ЕЭМИ не зависит от влажности, также в твердых кварцсодержащих породах при нагружении наблюдается сильный пьезоэффект, который способен усиливать амплитуду ЕЭМИ до 10 и более раз;

- особенностями ЕЭМИ угля является то, что с одной стороны зернистая структура угля является источником трибоэффекта как в крепких породах, с другой стороны поры, заполненные флюидами и микропленочная влага создают эффекты характерные для осадочных пород;

- от крепких пород ЕЭМИ угля отличается меньшей долей высокочастотных компонент (нет пьезоэффекта кварца), в то же время остается определенное сходство – хрупкое разрушение, порождающее сильные импульсы ЭМИ;

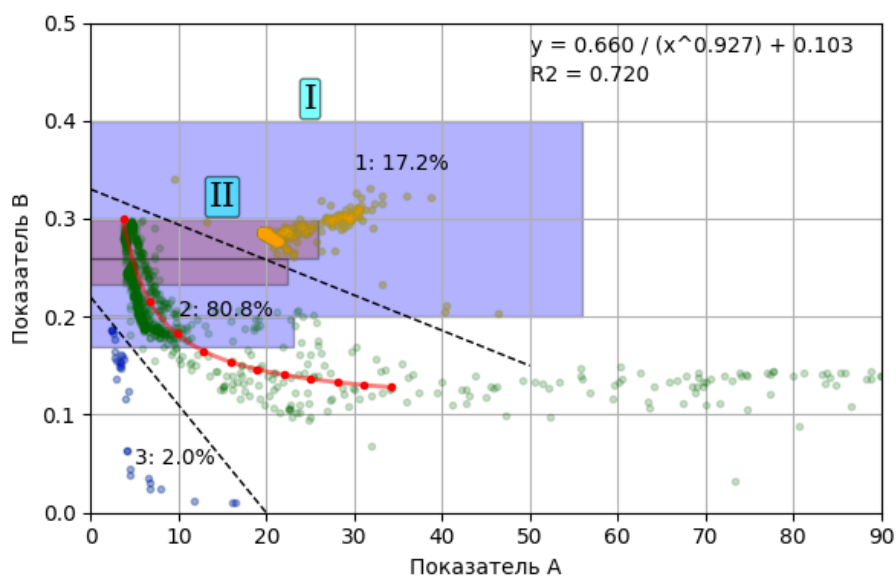
- от рыхлых осадочных пород уголь отличается существенно более высокой амплитудой ЕЭМИ – в 10-100 раз выше, и частотный диапазон смещен в высокочастотную область, в то же время остается определенное сходство – фоновые низкочастотные шумы при медленной деформации;

Таким образом, генерация ЕЭМИ в углях носит гибридный характер, порождаемый наложением токов от трибоэффекта и движения поровых флюидов.

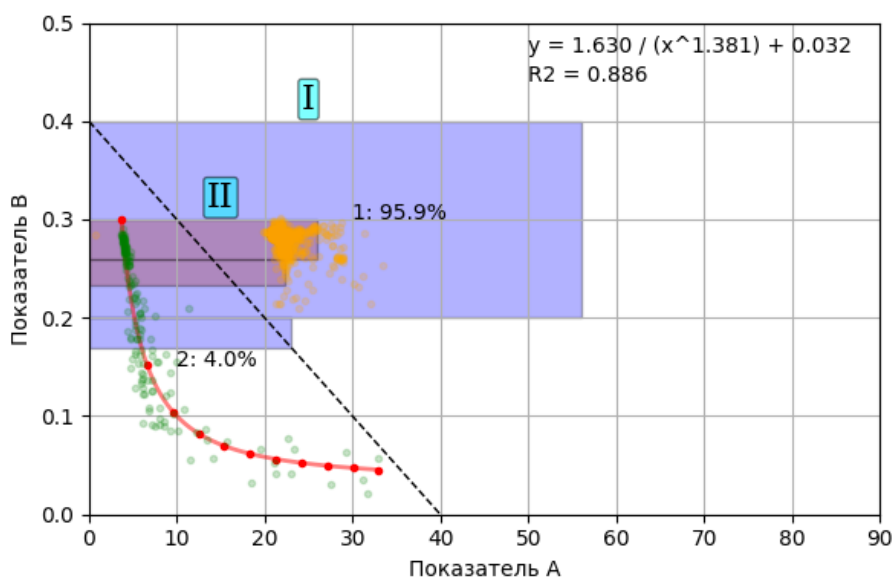
Т.к. организованных исследований ЕЭМИ конкретно доломитов не проводилось, то можно лишь предположить, их наиболее однородные, плотные

версии должны мало отличаться от крепких пород, в то же время как газонасыщенные доломиты из-за зернистой структуры и наличия пор с флюидами должны быть близки по проявлениям ЕЭМИ к углю.

На рисунке 6.21 представлены поля изображающих точек замеров регистрируемых показателей выбросоопасности А и В из методики комплекса «Ангел-М». На рисунке 6.21-а приведены результаты замеров за 2019-2023 гг. на руднике «Интернациональный».



а)



б)

Рисунок 6.21 – Поля изображающих точек замеров регистрируемых показателей выбросоопасности: а) на руднике «Интернациональный»; б) на угольных шахтах Кузбасса и Республики Казахстан

На рисунке 6.21-б приведены результаты замеров на отобранных угольных шахтах Кузбасса и Республики Казахстан с гарантированно низким уровнем помех.

На рисунке 6.21-а различными цветами с подписями от 1 до 3 обозначены три хорошо различимые группы изображающих точек замеров, к номерам кластеров указана их численность в % от общего числа замеров. На рисунке 6.21-б выделилось два кластера.

По мере проведения выработок на руднике «Интернациональный» менялась глубина и ГГУ (толщина, крепость и газоносность слоев), соответственно, проводилось уточнение границ безопасной зоны (рис. 6.18), ее усредненное положение представлено на рисунке 6.21 закрашенной областью с маркером I. Для сравнения представлено усредненное положение безопасной зоны для отобранных угольных шахт Кузбасса и Республики Казахстан – закрашенная область с маркером II.

Как видно из рисунка 6.21 система заполнения областей значений параметров *A* и *B* для двух типов месторождений и ГГУ имеют много общего. Выскажем следующее допущение: выбросоопасные состояния относительно редки, соответственно, регулярные замеры на предприятиях в массе своей должны консолидироваться вокруг фоновых значений для основных типов пород и укладываться в безопасные зоны.

Если сравнить первую группу (1 – желтые точки) на шахтах и руднике, то можно сделать вывод, что для рудника такие замеры нередкое, но второстепенное явление (17%), в то же время для шахт это подавляющее число (96%). Для второй группы (2 – зеленые точки) имеем обратное соотношение – это основная часть замеров для рудника (81%) и менее 5% для шахт. Третья группа (3 – синие точки) проявился только в 2% случаев на руднике.

Сопоставляя эти наблюдения с представленными выше особенностями проявления ЕЭМИ в различных породах и угле, можем сделать вывод, что эти особенности и отобразились на рисунке 6.21:

– для угля в основной массе характерны проявления ЕЭМИ по типу осадочных пород – слабо отличимый от фоновых значений рост амплитуд (параметр  $A$ ), сопровождаемый такой же несущественной перестройкой структуры сигнала (параметр  $B$ ) в сторону увеличения числа импульсов с чуть большей энергией, однако, отдельные угольные пласты и/или почва и кровля, в редких случаях, проявляют себя как крепкие породы;

– для рудника в основной массе характерны проявления ЕЭМИ по типу крепких пород – сильный, кратный рост амплитуд и существенная перестройка структуры сигнала в сторону увеличения числа этих высокоамплитудных импульсов, однако, отдельные участки массива в силу нарушенности, увлажнения, пористости и газонасыщенности проявляют свойства осадочных пород и угля.

Визуально определяемая слоистость кластера 2 на руднике и наличие кластера 3 подводит к выводу о том, что здесь имеется как минимум три консолидированных по свойствам типа породных слоев разной крепости.

При очевидной функциональной организованности и для более детального сравнения построены регрессионные модели вида  $B = a/A^b + c$  точек группы (2) для рудника и шахт в диапазонах значений  $A \in [0; 35] \cup B[0; 0,3]$  (формулы на рис. 6.21). Регрессионные модели изображены в виде линий, на которых нанесены эквидистантные вдоль кривой маркеры (точки).

Обращает на себя внимание хороший коэффициент детерминации ( $R^2$ ) (рис. 6.21). Следовательно, модель обратной связи показателей  $A$  и  $B$  для крепких пород вполне адекватна. Если сравнить параметры регрессионных моделей, то можно оценить показатели степени  $b$  как близкие к единице (0,93 и 1,4). В то же время масштабный коэффициент  $a$  для угольных шахт (1,63) приблизительно в 2,5 раза больше, чем для рудника (0,66), т.е. при общем диапазоне изменений показателей  $A$  и  $B$  на рудниках прирост амплитуд в 2,5 раза выше.

Чтобы оценить подобие распределений точек в группе (2) на рисунке 6.22 приведены графики плотности замеров вдоль регрессионных кривых.

Здесь наглядно проявляются отмеченные выше различия между типами пород: на руднике породы сравнительно прочные, их свойства консолидированы, основная масса точек (замеров) находится в безопасной зоне и укладывается в 10 % ее длины от верхней точки.

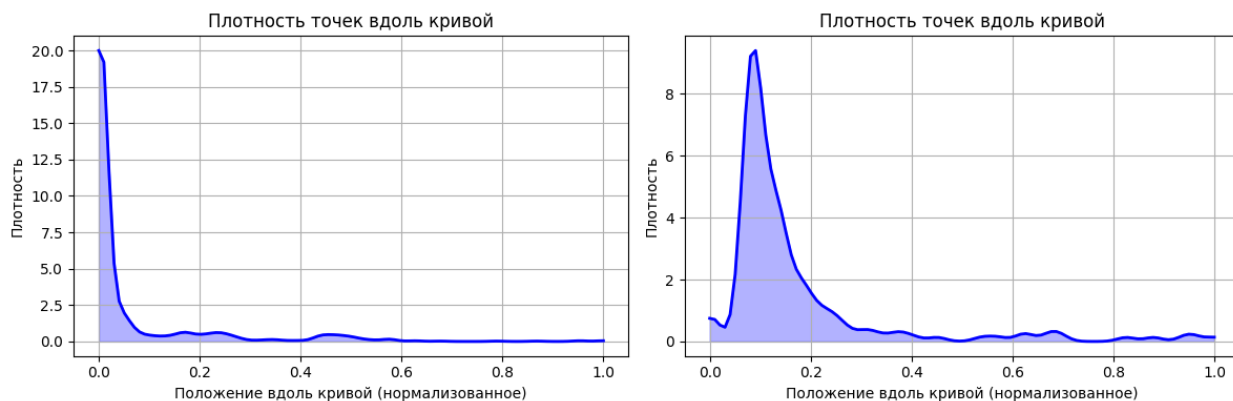


Рисунок 6.22 – Графики плотности замеров в группе (2) вдоль регрессионных кривых: а) на руднике «Интернациональный»; б) на угольных шахтах Кузбасса и Казахстана

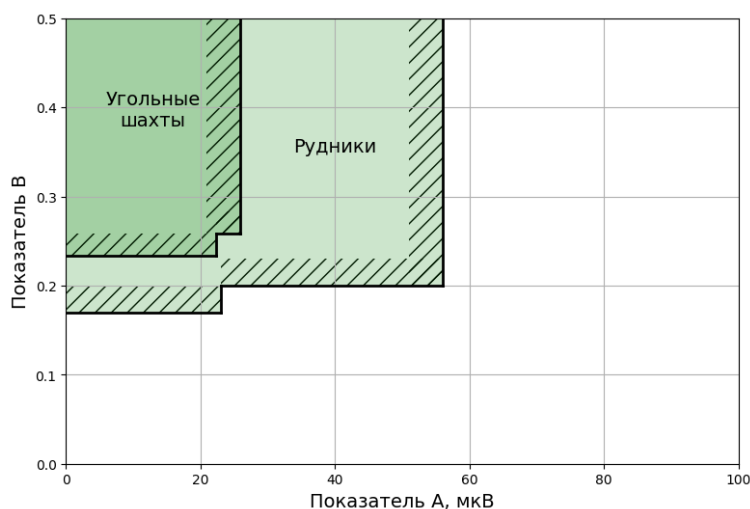


Рисунок 6.23 – Области пороговых значений показателей выбросоопасности *A* и *B*: над штриховкой находятся зоны категории НЕОПАСНО

На шахтах уголь и породы имеют по ЕЭМИ гибридные свойства, их свойства размыты, но основная масса точек (замеров) также находится в безопасной зоне и укладывается в 20 % ее длины от верхней точки.

Наблюдаемые различия диапазонов прогностических параметров наглядно представлены на рисунке 6.23.

Таким образом, в результате сравнительного анализа материалов прогноза опасности проявления газодинамических явлений при проведении выработок на угольных и рудных месторождениях установлено, что для первых критерием выбросоопасности является рост частоты электромагнитных импульсов сравнительно малой энергии, для вторых – в большей степени рост энергии (в 2 и более раза) и частоты событий с высокой энергией.

## **6.6 Выводы по главе**

1. Разработан метод локального прогноза ГДЯ, основанный на зависимости параметров естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) идущего из массива вследствие изменений его НДС в зонах тектонического влияния геологических нарушений, прошедший шахтную апробацию на руднике «Интернациональный» позволяющий установить наличие потенциально выбросоопасного участка массива за несколько метров до подхода к нему забоя.

2. 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 месторождения – по начальной скорости газовыделения, выходу буровой мелочи;
- рудных месторождениях – по дискованию керна, скорости газовыделения, акустической эмиссии.

3. По результатам шахтных испытаний методики прогноза установлено, что положение участков опасных по проявлению ГДЯ в пределах 15 м достоверно определяется по изменению амплитуды электромагнитных

импульсов. При этом локализация зон нарушений опасных по проявлению ГДЯ производится на основе результатов каротажа скважины при изменении показателей ЕЭМИ на величину 5-10% от фонового значения.

## 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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов И. Л. Система классификации динамических явлений на угольных шахтах // Фундаментальные и прикладные проблемы в горном деле: Материалы всероссийской научно-практической конференции. – Междуреченск, 2016. – С. 172-175
2. Абрамов И.Л. Виды и причины газодинамических явлений на угольных шахтах // Вестник КузГТУ.– 2015.– №1 (107).– С. 16-17
3. Абрамов Ф.А., Зорин А.Н., Ефремов Э.И. и др. Некоторые аспекты теории выбросов угля, породы и газа // Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа.– М., 1978. С.92-121.
4. Айруни А.Т. Теория и практика борьбы с рудничными газами на больших глубинах. — М.: Недра, 1981. — 335 с.
5. Аммосов М.И., Еремин И.Б., Ермаков В.И. и др. Зависимость внезапных выбросов в угольных шахтах от петрографических особенностей углей // Труды ИГИ.- 1955.- т. 6.- С. 62-102
6. Андрейко С. С. Предотвращение выбросов породы и газа при проходке подготовительных выработок в доломитовых породах на больших глубинах // Горное эхо. – 2020. – С. 83-91
7. Андрейко С.С., Иванов О.В., Литвиновская Н.А., Лукьянец Е.В. Предотвращение газодинамических явлений при последовательной отработке сильвинитовых пластов КрII и АБ в условиях Верхнекамского месторождения калийно–магниевых солей // Горный журнал. 2023. № 11. С. 20–26.
8. Андрейко С.С., Калугин П.А., Щерба В.Я. Газодинамические явления в калийных рудниках: генезис, прогноз и управления.- М.: Высшая школа, 2000.– 335 с.
9. Андрейко С.С., Литвиновская Н.А., Папулов А.С. Оценка возможности развития газодинамических явлений на II калийном горизонте Старобинского месторождения калийных солей // Известия Томского

политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.- 2023.- Т. 334. № 4.- С.126–134.

10. Андрейко С.С., Лялина Т. А. Оценка возможности развития газодинамических явлений в виде внезапных разрушений пород почвы горных выработок, сопровождающихся газовыделением, в условиях южной части Верхнекамского месторождения // Недропользование.- 2013.- №.7.- С. 107-115.

11. Андрейко С.С., Нестерова С.Ю. Природа внезапных разрушений приконтурной части массива при проходке подготовительных выработок в руднике Гремячинского горно-обогатительного комбината // Недропользование.- 2022.- Т. 22, № 3.- С.144-150

12. 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.

13. Анциферов А.В., Камбурова Л.А., Киселев Н.Н., Радченко А.Г., Радченко А.А. Внезапные выбросы углей и газа в условиях Донбасса в ряду метаморфизма и с ростом глубины // Труды РАНИМИ: сб. научн. трудов. – Донецк, 2019. – № 8 (23), часть 2.– С. 173–192.

14. Анциферов А.В., Киселев Н.Н., Радченко А.Г., Федотов С.М., Радченко А.А. Граничные условия и минимальные глубины проявления внезапных выбросов угля и газа на шахтах Донбасса // Труды РАНИМИ: сб. научн. трудов. – Донецк, 2020. –№ 10 – 11 (25 – 26). – С. 204–223.

15. Арнольд В.И. Теория катастроф.- 3-е изд, доп.- М.: Наука, 1990.- 128 с.

16. Артемов А.В., Беликов В.В. Молекулярное строение и выбросоопасные свойства углей // Управление вентиляцией и газодинамическими явлениями в шахтах.- Новосибирск, 1979.- С.38.

17. Артемов А.В., Беликов В.В. Структурные особенности углей в зонах выбросоопасных геологических нарушений // Химия твердого топлива.- 1981.- № 3.- С.130-133.
18. Артемов В.А., Фролков Г.Д. Особенности молекулярной структуры углей в выбросоопасных зонах пластов Донбасса // Уголь.- 1975.- № 11.- С. 30-32
19. Белодедов А. А. Обоснование эффективности технологии проведения выработок с разгрузочными полостями при установлении устойчивых параметров угольных целиков // Горный информационно-аналитический бюллетень. -2010.- №4.- С. 197-201
20. Биленко В.Я. Внезапные выделения газа и меры борьбы с ними // Безопасность труда в горной промышленности. — 1932. — № 4—6.
21. Бич Я.А. Горные удары и методы их прогноза. — М.: ЦНИЭИ-уголь, 1972. — 101 с.
22. Бобров И.В., Кричевский Р.М., Михайлов В.И. Внезапные выбросы угля и газа на шахтах Донбасса.- М.: Углетехиздат, 1954.- 515 с.- Севастополь, 2003.- 284 с.
23. Богоудинов Р.М., Рыжков М.Ф. К вопросу обеспечения безопасности проведения горных выработок по выбросоопасным породам на основе данных информационно-аналитической программы регистрации выбросов породы и газа // Уголь.- 2025.- № 10.- С. 70-72
24. Большинский М.И. Природа и механизм газодинамических явлений в шахтах и принципы их предотвращения // Уголь Украины.- 1978.- № 9.- С. 30-33.
25. Большинский М.И., Лысыков Б.А., Каплюхин А.А. Газодинамические явления в шахтах.- Севастополь-Донецк, 2003.- 284 с.
26. Борисенко А.А. Механизм участия газа в процессе внезапного выброса // Вопросы теории выбросов угля, породы и газа. - Киев, 1973.- С. 185-194.

27. Борисов А.А., Гликман А.Г., Казакова В.Л. Геоакустические методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов. –Л.: ЛПИ, 1984.– 39 с.
28. Булат А.Ф., Дырда В.И. Некоторые проблемы газодинамических явлений в угольном массиве в контексте нелинейной неравновесной термодинамики // Геотехнічна механіка. – 2013. – Вып. 108. – С. 3–30.
29. Быков Л.Н. Внезапные выбросы, их природа и борьба с ними в шахтах.- Тула: Приокск. изд-во, 1972.- С. 40 с.
30. Быков Л.Н. Теория и основные принципы эксплуатации пластов, склонных к внезапным выделениям. -М., ОНТИ, 1936.- 184с.
31. Венгер В.Г., Горностаев В.С., Ногаев С.Н., Панин С.Ф., Зеляева Е.А. Оценка структуры и состояния пород кровли различными методами в условиях шахты «Чертинская-Коксовая» // Вестник НЦ ВостНИИ.- 2019.- №1- С. 43-52
32. Вереда В.С., Юрченко Б.К. К вопросу о возможных причинах выбросов угля, газа и пород в Донецком бассейне. // Вопросы теории выбросов угля, породы и газа: Материалы семинара.- Киев, 1973.- С 301-308
33. Внезапные выбросы угля и газа и структура угля. — М. : Наука, 1969. — 160 с.
34. Вольпова Л. С. Особенности газодинамических зон Воркутского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. -2009.- №12.- С. 238-248
35. Высотин Н. Г., Косырева М. А., Лейзер В. И., Аксенов З. В. Обоснование создания комплексного стенда для физического моделирования геомеханических процессов во вторичных полях напряжений в условиях разработки месторождений конвергентными горными технологиями // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 10. – С. 131–145
36. Гаврилов В. И. Разработка способа дегазации газонасыщенных пологих угольных пластов гидродинамическим воздействием // Горные науки и технологии.- 2019.- Т.4, № 3.- С. 160-171

37. Галушко В.Т., Зорин А.Н. Выбросы пород в горных выработках шахт Донбасса.- Киев, 1972.- 114 с.
38. Галушко Н.Я. О природе внезапных выбросов породы на шахте "Щегловская-Глубокая" // Уголь Украины.- 1964.- № 2.
39. Голобурдина М.Н., Граханов С.А., Дак А.И., Зубова Т.Н., Мальковец В.Г., Проскурнин В.Ф., Тарасов А.В. Новые данные о возрасте и сохранности архейского блока фундамента под Накынским кимберлитовым полем, Республика Саха (Якутия) // Региональная геология и металлогения.- 2025.- №2.- С. 44-60
40. Горное дело: Терминологический словарь/ К. Трубецкой.- 5-е изд.- М., 2022.- 638 с.
41. ГОСТ Р 58150— 2018 Динамические явления в угольных шахтах. Термины и определения.- М, 2018.- 19 с.
42. Гребенкин С.С., Павлыш В.Н., Самойлов В.Л., Петренко Ю.А. Управление состоянием массива горных пород.- Донецк, 2010.- 193 с.
43. Гречишкин П.В. Моделирование процесса гидрорасчленения угольного пласта // Горный журнал. – 2024. – № 1. – С. 56–61.
44. 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.
45. 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.
46. 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.

47. Гречишкин П.В., Малова С.А. Природа и механизм выбросов газа и породы // Горный журнал. – 2023. – № 1. – С. 35–40.
48. 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.
49. 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.
50. Гречишкин П.В., Пуль Э.К. Исследование механизма выбросов породы и газа на рудных месторождениях // Горный журнал. – 2025. – № 1. – С. 28–32.
51. 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.
52. 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.
53. 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.
54. 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.

55. Дюк Ю.А., Контримас А.А. Многофункциональные системы безопасности и методы текущего прогноза выбросоопасности угольных пластов // Вестник Научного центра.- 2020.- №1.- С. 36-42

56. Еременко В. А. Моделирование напряженнодеформированного состояния горнотехнической системы рудника при соосной отработке трех этажей камерной системой разработки (в программном комплексе Map3D) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – №11. – С. 5-17

57. Еременко В. А., Аксенов З. В., Пуль Э. К., Захаров Н. Е. Исследование структуры вторичного поля напряжений призабойной части подготовительных выработок при проходке выбросоопасных пластов с использованием программы Map3D // Горный информационно-аналитический бюллетень .– 2020 .– №5 .– С. 91-104

58. Ефремов Э.И., Харитонов В.Н., Семенюк И.А. Взрывное разрушение выбросоопасных пород в глубоких шахтах.- М., 1979.- С. 253 с.

59. Желтков И. В. Разработка методов оценки выбросоопасности и способов предотвращения внезапных выбросов угля и газа в очистных забоях угольных шахт:

60. Забигаило В.Е. Геологические основы теории прогноза выбросоопасности угольных пластов и горных пород.- Киев: Наукова думка, 1978. - 164 с.

61. Забигаило В.Е., Николин В.И. Влияние катагенеза горных пород и метаморфизма углей на их выбросоопасность.- Киев: Наукова думка, 1990.- 167 с.

62. 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.

63. Зинчук Н.Н. Особенности состава основной массы кимберлитов // Отечественная геология.- 2025.- №1.- С. 79-103
64. Зтингер И.Л. Внезапные выбросы угля и газа и структура угля. - М.: Недра, 1969. - 160 с.
65. Зубарев Ю.П., Шойхед М.А О геологической основе гипотез внезапных выбросов угля и газа на примере Донбасса // Вопросы теории выбросов угля, породы и газа: Материалы семинара.- Киев, 1973.- С 333-335
66. Зыков В. С. Научные проблемы борьбы с газодинамическими проявлениями в угольных шахтах Кузбасса // Маркшейдерия и недропользование. – 2011. – № 3. –С. 57-59.
67. Зыков В. С. Техногенная геодинамика: учеб.пособие. – 266 с.
68. Зыков В.С. Внезапные выбросы угля и газа и другие газодинамические явления в шахтах. – Кемерово, 2010. – 334 с.
69. Зыков В.С. Факторы и свойства горного массива, определяющие вид опасности по геодинамическим явлениям // Вестник КузГТУ.- 2014.- №5 (105).- С. 9-17
70. Зыков В.С., Абрамов И.Л. Динамические явления в угольных шахтах и их классификация // Маркшейдерия и недропользование. – 2012. – № 4. – С. 56–60.
71. Зыков В.С., Абрамов И.Л. Уточнение классификации динамических явлений в угольных шахтах // Вестник Научного центра.- 2015.- №3.- С. 74-84
72. Зыков В.С., Абрамов И.Л., Торгунаков Д.В. Статистика динамических явлений в шахтах и уточнение их классификации // Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2013.- №6.- С. 297-319
73. Зыков В.С., Желтков И.В. Предупреждение внезапных выбросов в очистных забоях пологих угольных пластов // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Тр. международной научно-практической конференции. – Кемерово, 2001. – С. 108 –110.

74. Зыков В.С., Лебедев А.В., Сурков А.В. Предупреждение газодинамических явлений при проведении выработок по угольным пластам.- Кемерово: ВостНИИ, 2010.- 262 с.

75. Зыков В.С., Тайлаков О.В., Вьюников А.А., Ворожцов С.Г. Исследование газодинамических явлений на руднике «Интернациональный» и разработка комплекса мер по их предупреждению // Горная промышленность.- 2023.- №2.- С. 126-132

76. Иванов Б. М. Современные представления о классификации газодинамических явлений в угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2005.- №2.- С. 153-167

77. Иванов Б.М., Фейт Г.Н., Яновская М.Ф. Механические и физико-химические свойства углей выбросоопасных пластов. -М,: Наука, 1979, 196 с.

78. Иванов О.В., Нестерова С.Ю., Лядов В.О., Лукьянец Е.В. Региональное прогнозирование зон, опасных по газодинамическим явлениям, в условиях шахтного поля Талицкого ГОКа / // Горный журнал.- 2023.- № 11.- С.84–88.

79. Игнатов Е. В., Тюленев М. А. Геомеханическое обоснование геометрических и технологических параметров системы разработки «длинными полосами с короткими забоями» // Техника и технология горного дела. - 2023. - №2 (21). – С. 59-86

80. Игнатов Е.В., Иванова О.В. Некоторые результаты анализа экспериментов по дезинтеграции кровли в Кузбассе // Вестник КузГТУ.- 2010.- №4.- С. 24-27

81. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа: (РД 05-350-00): официальное издание: утверждена постановлением Госгортехнадзора России от 04.04.00 N 14, введена в действие постановлением Госгортехнадзора России от 22.06.00 N 36 : дата введения 2000-10-01. – 160 с.

82. Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений : официальное

издание : утверждена приказом Федеральной службы по экологическому, техническому и атомному надзору от 10.12.2020 № 515. – Москва, 2020. - 114 с. - (Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности)

83. Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений : официальное издание : утверждена приказом Ростехнадзора от 15.08.2016 № 339. – Москва, 2020. - 114 с. - (Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности)

84. 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.

85. 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.

86. 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.

87. 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.

88. 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.

89. Исследование механизма формирования опасных по газодинамическим явлениям зон в породах калийного горизонта / С.П. Береснев [и др.] // Горный журнал.- 2010.- №. 8.- С. 31-33.

90. Казикаев Д.М. Эффективные пути решения проблем разработки алмазных месторождений Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2015.- №6. – С. 45-48
91. Карпов А.М. Внезапные выделения метана в шахтах Центрального района Донбасса. -М., ОНТИ, 1935.- 98 с.
92. Катков Г. А. Геомеханическое обоснование параметров щелевой разгрузки угольного пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2001.- №8.
93. Клюкин Г.К. Особенности внезапных выбросов угля и породы и состояние выбросоактивного газа // Вестник КузГТУ.- 2009.- №6. – С. 38-41
94. Колесников В.В. Физические аспекты выбросоопасного состояния каменных углей. Общий анализ: Препринт.- Ростов-на-Дону, 1992.- 34 с.
95. Колесниченко Е.А., Артемьев В.Б., Колесниченко И.Е. Внезапные выбросы метана: теоретические основы.- М.: Горное дело, 2013.- 232 с.
96. Колесниченко И.Е., Артемьев В.Б., Колесниченко Е.А., Любомищенко Е.И. Основы квантовой теории образования в угольных пластах и дегазации метана // Горная промышленность.- 2019.- №2.- С. 47–50.
97. Коньков Г.А. О связи новейших и современных тектонических движений с метаноносными и выбросными зонами в условиях Донецкого бассейна // Докл. АН СССР.- 1962.- т. 143, № 3.- с. 670-673.
98. Король В.И., Скобенко А.В. Акустический способ прогноза газодинамических явлений в угольных шахтах. – Донецк: Национальный горный университет, 2013. – 181 с.
99. Косенко Б.М. Изменение содержания метана и высших углеводородов в каменных углях и антрацитах Донбасса // Геология угольных месторождений. – М., 1969. – Т.1. – С. 129–135.
100. Косырева М. А. Геомеханическое обоснование формы и размеров целиков при подземной разработке соляных месторождений вертикальными камерами цилиндрической формы: Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук [Неопубл] .- М., 2024.- 136 с.

101. Кравцов А.И. Геологические условия возникновения внезапных выбросов угля и газа //Борьба с внезапными: выбросами в угольных шахтах.- М., 1962.- С.591-597
102. Кравцов А.И. Материалы совещания по внезапным выбросам угля и газа.- М., 1952.- 244 с.
103. Красюкова Н.Л., Зубец А.Ж., Еремин С.Г., Зубенко А.В., Лаффах А.М. Мультиагентные методики планирования вскрышных работ и минимизации экологических рисков при добыче полезных ископаемых // Горная промышленность.- 2025.- №1.- С. 170-176
104. Куликов А.П., Иванов Б.М. Прогнозирование выбросоопасности угольных пластов по геологическим факторам.- М., 1975.- 37 с.
105. Курта И. В. Методы и схемы дегазации угольных пластов: метод. указания. – Ухта : УГТУ, 2015. – 35 с.
106. Кутузов Б.Н., Бутуков А.Ю., Вайнтейн Б.И. Взрывные работы в опасных условиях угольных шахт.- М., 1979ю- 373 с.
107. Ларин М. К., Розум И. Г., Бушуев К. И. Виды и причины газодинамических явлений на угольных шахтах // Вестник СибГИУ.- 2019.- №4 (30). – С. 25-27
108. Левин А.В., Акимочкин П.В. Исследование напряженного состояния труднообрушаемых пород кровли методом разгрузки // Измерение напряжений в массиве горных пород : Материалы IV Всесоюз. семинара, Новосибирск, 26-29 июня 1973 г. – Новосибирск, 1974. – С. 41-43.
109. Лидин Г. Д. Опыт классификации необычных выделений газа из разрабатываемого угольного пласта // Труды ин-та горного дела. – М., 1959. – С. 119–140.
110. Лидин Г.Д. Горно-статистический метод прогноза метанообильности угольных шахт // Труды ИГД. - М.: АН СССР, 1954. -Т.1. - С.145-155.
111. Лидин Г.Д., Кравцов А.И. Газодинамические явления в горных выработках, геологические условия их возникновения и прогноз по

геологоразведочным данным // Газоносность угольных бассейнов ж месторождений СССР, Т. 3.- М., 1980.- С. 152-185.

112. Лидин Г.Д., Петросян А.Д. Газообильность каменноугольных шахт СССР.- М.-Л.: АН СССР, 1949. - 224 с.

113. Липчанский А.Ф., Толмачев П.А. Анализ метановыделений при газодинамических явлениях // Уголь Украины.- 1977.- № 3.- С.40,-41.

114. Литвиновская Н.А., Папулов А.С., Петровский А.Б., Подлесный И.А. Оценка газодинамической опасности пород кровли подготовительных горных выработок при их проходке на Третьем калийном пласте / // Горный журнал.- 2023.- № 8.- С.24–28.

115. Лукьянец Е.В., Бобров Д.А. Механизм образования очагов газодинамических явлений в складчатых структурах калийных пластов // Горное эхо.- 2020.- №. 2.- С. 106-114

116. Малышев Ю. Н., Сагалович О. И., Лисуренко А. В. Техногенная геодинамика. Книга 1: Аналитический обзор. Актуальные проблемы. – М.: Недра, 1995. – 430 с.

117. Матвиенко Н.Г. Научные основы обеспечения безопасности освоения газоносных рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2011.- №S1.- С. 238-253

118. Методические рекомендации по изучению напряженно-деформированного состояния горных пород на различных стадиях геологоразведочного процесса. – М.: ВНИИгеоинформсистем, 1987. – 116 с.

119. Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам : нормативные документы в сфере деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Серия 06. Документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в горнорудной промышленности. Вып. 8. – М, 2016. - 51 с.

120. Методические указания по классификации газодинамических явлений на угольных шахтах/ А.И. Бобров, Л.А. Вайнштуйн, М.А. Ильяшов и др.- Донецк, 1991.- с.

121. Методическое руководство по определению типа газодинамических явлений на рудниках Верхнекамского месторождения / Министерство по производству минеральных удобрений СССР; Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт галургии.- Пермь, 1983.- 12 с.

122. Минеев С.П., Рубинский А.А., Витушко О.В., Радченко А.Г. Горные работы в сложных условиях на выбросоопасных угольных пластах:[монография] / С.П. Минеев, // Донецк: ООО «Східний видавничий дім», 2010. – 603 с.

123. Мирнинский ГОК, рудник «Интернациональный»: Промежуточный отчет по результатам прогнозно-профилактических и проходческих работ по спиральному съезду 11ЭБ в условиях склонности к проявлению ГДЯ на руднике «Интернациональный» (1-ый этап).- Мирный, 2019.

124. Молев М.Д. Геофизическое прогнозирование горно-геологических условий подземной разработки угольных пластов. – Новочеркасск: ЮРГТУ. 2000.

125. Мороз Н.Е., Гендлер С.Г., Романевич К.В. Оценка опасности газодинамических явлений на основе анализа натурных и лабораторных исследований скоростей распространения упругих волн во вмещающих горных породах кимберлитовой трубки «Интернациональная» // Горная промышленность.- 2025.- №2.- С. 65-72

126. Мурашев В. И., Федченко Ю. А. Внезапные выбросы угля и газа и горные удары на шахтах России.— Кемерово: РИПК, 2001. – 61 с

127. Мурашев В.И. Механизм развязывания внезапных выбросов угля и газа в горных выработках // Основы теории внезапных выбросов угля и газа. — М.: Недра, 1978. — С. 141—162.



128. Мюллер Р.Я., Попов В.С. О метанообразовании в углях в связи с внезапными выбросами угля и газа в шахтах // Труды ИГД АН СССР (Сиб. отд.).- 1960.- вып. III
129. Нгуен Ван Минь Прогноз мощности зон растягивающих деформаций при проходке подготовительных горных выработок на глубине свыше 1 км: Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук [Неопубл] .- М., 2021.- 112 с.
130. Неганов В.П., Коваленко В.И., Зайцев Б.М., Сосновский Л.И. Технология разработки золоторудных месторождений / под ред. Неганова В.П. - М.: Недра, 1995.- С. 336.
131. Некрасовский Я.Э. Разработка пластов, подверженных внезапным выбросам угля и газа. -М.: Углетехиздат, 1951.- 223с.
132. Нестеров Е.А., Бобров Д.А., Папулов А.С., Лядов В.О. Обоснование параметров профилактического дегазационного бурения для условий юго-восточной части шахтного поля рудника ООО «ЕвроХим - Усольский калийный комбинат» / // Горный журнал. 2023. № 11. С.94–96.
133. Нестеров Е.А., Папулов А.С., Макаров Д.А. Определение типа и механизма протекания газодинамического явления в условиях Усть-Яйвинского рудника // Известия ТулГУ. Науки о Земле.- 2024.- Вып.4.- С. 737-744
134. Николин В.И. О природе локальности выбросоопасности // Уголь.- 1965.- № 3
135. Николин В.И. Представления (гипотеза) о природе и механизме выбросов угля, породы и газа // Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа. - М.,1978.- С.122-140
136. Николин В.И. Разработка выбросоопасных пластов на глубоких шахтах.- Донецк, 1976. - 182 с.
137. Николин В.И., Васильчук М.П. Прогнозирование и устранение выбросоопасности при разработке угольных месторождений.- Липецк: Изд. Роскомпечати,1997.- 496 с.

138. Николин В.И., Лысиков Б.А., Ткач В.Я. Прогноз выбросоопасности угольных и породных пластов.- Донецк: "Донбасс", 1972.- 128 с.
139. Ножкин Н.В. Заблаговременная дегазация угольных месторождений.- М.: Недра, 1979. – 271 с
140. Обухов А. А., Фролков Г. Д., Артемьев В. Б. Структурно-химическая механика углей метаморфического ряда пластов, опасных по внезапным выбросам угля и газа. – Шахты: Издательство Южно-российского отделения АГН РФ, 2000. – 151 с.
141. Ольховиченко А.Е. К вопросу о природе и механизме выбросов угля и газа в выработках с узкими забоями // Вопросы теории выбросов угля, породы и газа.- Киев, 1973.- С.194«»200.
142. Опарин В.Н., Киряева Т.А. Геомеханические и физико-химические процессы, определяющие выбросо- и пожароопасность угольных пластов Кузбасса. Механизмы разрушения горных пород // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета.- 2014.- № 3.- С. 69–87.
143. Осецкий А.И., Глушко В.Т., Зорин А.Н. и др. Выявление вероятных тектонических нарушений и выбросоопасных зон.- Киев: Наукова думка, 1973, - 120 с.
144. Осипов С.Н., Волошин Н.Е. О природе выбросов пород в горные выработки // Вопросы теории выбросов угля, породы и газа. - Киев, 1973.- С. 125-144.
145. Основы проектирования дегазации угольных шахт и рудников России [Текст] / А. Д. Рубан [и др.]. — Москва : Горное дело, 2011. — 271 с.
146. Петросян А. Э., Яновская М. Ф., Иванов Б. М., Крупеня В. Г. Исследование процессов возникновения внезапных выбросов угля и газа. – М.: Наука, 1978. – 110 с.

147. Петросян А.Э., Иванов Б.М. Причины возникновения внезапных выбросов угля и газа // Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа. – М.: Недра, 1978. – С. 3–61.
148. Петросян А.Э., Иванов Б.М., Крупеня В.Г. Теория внезапных выбросов. – М.: Наука, 1983. – 152 с.
149. Петухов И.М. Горные удары на угольных шахтах. – СПб.: Наука, 1983. – 238 с.
150. Петухов И.М., Батугина И.М. Геодинамика недр. – 2-е изд. – М.: Недра; 1999. – 287 с.
151. Петухов И.М., Линьков А.М. Механизм развязывания и протекания выбросов угля (породы) и газа // Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа: Сб. науч. тр. – М.: Недра, 1978. – С. 62–90.
152. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. – М.: Недра, 1983. – 279 с.
153. Печук И.М. Дегазация спутников угольных пластов скважинами. – М.: Углетехиздат, 1956. – 210 с.
154. Печук И.М. Обратная метаноносность высокометаморфизированных антрацитов с глубиной // Уголь Украины. – 1967. – №6.
155. Печук И.М. Проникновение газов по трещиноватым породам в помещения и выработки. — К.: Изд-во АН УССР, 1962. – 112 с.
156. Печук И.М. Результаты наблюдений за внезапными выделениями на шахтах Донбасса за 1933-1935 гг. // Труды ВУГИ. – Харьков, 1936. – С. 115-192.
157. Платонов П. А., Данилова В. Е., Золотин В. Г. Ведение горных работ в условиях повышенной газодинамической активности ниже гор. -790 м, рудник «Интернациональный» // Молодежь и научно-технический прогресс в современном мире: Сборник материалов XI-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Северо-

Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова. – Мирный, 2022.  
– С. 57-63

158. Подземный рудник «Интернациональный»: Указания по безопасному ведению горных работ на подземном руднике «Интернациональный» склонном к горным ударам с глубины ниже 1245 м.- Екатеринбург, 2018.

159. Представления (гипотеза) о природе и механизме выбросов угля, породы и газа.- Макеевка:МакНИИ, 1976.- 24 с

160. Проведение шахтных экспериментальных исследований газоопасности по свободным газам и газодинамическим характеристикам вмещающих пород в условиях рудника «Интернациональный»: Отчет на оказание научно-технической услуги / ГИ УрО РАН [неопуб.].- Пермь, 2018.

161. Проскуряков Н.М. Внезапные выбросы породы и газа в калийных рудниках.- М.: Недра, 1980.- 2263 с.

162. Простов С.М., Дырдин В.В., Хямяляйнен В.А. Электромагнитный бесконтактный геоконтроль. – Кемерово: ГУ Кузбасский государственный технический университет, 2002. – 132 с

163. Пузырев В. Н., Балашова Т. А., Алексеев Д. В. О возможном явлении гистерезиса сорбции метана выбросоопасным углем при возбуждении колебаний давления свободного газа // Уголь. – 1993. – № 6. – С. 46–48.

164. Пузырев В.Н. Текущий прогноз опасности газодинамических явлений и способы их предотвращения // Уголь. — 1980. — № 5. — С. 21—25.

165. Пузырев В.Н., Черкасов В.С., Зыков В.С., Никифоров В.А. Методика дифференцированного текущего прогноза опасности газодинамических явлений, выбора и контроля способов их предотвращения для условий восточных районов. – Кемерово: изд. ВостНИИ, 1979. – 16 с.

166. Радченко А. Г., Киселев Н. Н., Федотов С. М., Решетняк Т. А., Радченко А. А. Новые модели формирования выбросоопасных зон в угольных

пластах на региональном и текущем уровнях // Журнал теоретической и прикладной механики.- 2021.- №3 (76).- С. 53-69

167. Разработка рекомендаций по обеспечению безопасности работы горного персонала в зонах, опасных по выбросам породы и газа, подготовка предложений для корректировки «СпецМерИнтер» в части ведения горных работ в зонах, опасных по выбросам породы и газа, составление заключительного отчета о НИР: Отчет на оказание научно-технической услуги (Заключительный)/ ГИ УрО РАН [неопуб.]- Пермь, 2019.

168. Российская угольная энциклопеди. Т.1 /Н.К, Гринько, А.И. Митейко, В.С. Зыков и др.- М.-СПб ВСЕГЕИ, .- 69 с.

169. Рыльникова М.В., Еременко В.А., Есина Е.Н. Условия формирования зон концентрации энергии горного массива. – М., 2014. – 179 с.

170. Садовский М.А. Геофизика и физика взрыва.- М., 2004. 440 с.

171. Севостьянова Р.Ф., Абукова Л.А. Гидрогеологические условия подсолевого этажа Мирнинского свода с позиций использования пластовых вод как источника гидроминерального сырья // Актуальные проблемы нефти и газа.- 2025.- №1.- С. 36-49

172. Семенов Ю.А., Витебский Я.Д. Исследование особенностей деформации труднообрушаемой кровли при применении метода передового торпедирования // Технология и механизация разработки мощных пологих пластов: Науч. Тр. – Караганда, 1977. – Вып.54.- С.88-93.

173. Сиволобцев К. С. Проблемы внезапных выбросов угля и газа при разработке угольных пластов карагандинского угольного бассейна // Интернаука. – 2019. - №43-1(125). – С. 30-2

174. Скочинский А.А. Рудничная атмосфера.– Москва, Ленинград, Новосибирск: Госгортехиздат, 1932.– 151 с.

175. Скочинский А.А. Современные представления о природе внезапных выбросов угля и газа в шахтах и меры борьбы с ними. -Уголь.- 1954.- № 7.- С.4-11.

176. Славолубов В. В. Прогноз и предотвращение внезапных выбросов угля и газа применительно к технологии проведения подготовительных выработок высокими темпами: Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук [Неопубл] .- М., 2020.- 140 с.

177. Сластунов С.В., Ермак Г.П. Обоснование выбора и эффективная реализация способов дегазации при интенсивной отработке газоносных угольных пластов — ключевой вопрос обеспечения метанобезопасности угольных шахт// Уголь.- 2013. – № 1. – С.21—24.

178. Соловьев Е.Э., Фридовский В.Ю., Кычкин В.А. Возможности геофизических исследований при региональном и локальном прогнозировании орогенных золоторудных месторождений // Природные ресурсы Арктики и Субарктики.- 2016.- №2 (82).- С. 15-21

179. Сосновская Е.Л., Ясыченко В.Б. Обоснование матрицы природных напряжений массива горных пород жильных месторождений Сибири и Дальнего Востока // Вестник ИрГТУ. 2011. №11 (58).- С. 74-77

180. Сосновская Е.Л., Ясыченко В.Б., Сосновский Л.И., Филонюк В.А., Жуков А.А. Естественное напряженное состояние массива горных пород золоторудных месторождений Восточной Сибири // Геомеханика в горном деле: доклады науч.-техн. конф.- Екатеринбург: Изд-во ИГД УрО РАН, 2009.- С. 55-62.

181. Степанович Г.Я., Николин В.И., Лысиков Б.А. Газодинамические явления при подготовке глубоких горизонтов.- Донецк, 1970.- 110 с.

182. Строительство горных выработок в сложных горно-технических условиях / под ред. Б.А. Картозия.- М, 1992.- 320 с.

183. Тверитинова Т.Ю. Волновая тектоника Земли // Геодинамика и тектонофизика. –2010. – Т. 1., № 3. – С. 297–312.

184. Турчанинов И.А., Йофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород.- М., 1977. - 503 с.

185. Фридовский В. Ю., Полуфунтикова Л. И. Микродеформационные структуры аккреционно-коллизийных золоторудных месторождений (на примере Восточной Якутии) // Вестник СВФУ.- 2007.- №1.- С. 23-27
186. Фролков Г.Д., Малова Г.В., Фролков А.Г. О влиянии напряженно-деформированного состояния угольного пласта на структуру органической массы и газовыделения при внезапных выбросах угля и газа: Препринт.- Ростов-на-Дону, 1992.- 15 с.
187. Хайнике Г. Трибохимия.- М., 1987.- 584 с.
188. Хачатрян Г.К., Анашкина Н.Е. Изменчивость условий природного алмазообразования по данным о распределении структурных примесей в объеме кристаллов алмаза // Отечественная геология.- 2025.- №1.- С. 37-57
189. Ходот В.В. Внезапные выбросы угля и газа.- М.: Госгортехиздат, 1991.- 363 с.
190. Ходот В.В. О моделировании газодинамических явлений // Уголь. — 1986,—№9. —С. 6—8.
191. Ходот В.В. Развитие теории внезапных выбросов и совершенствование способов борьбы с ними / В.В. Ходот // Уголь Украины. — 1979. — №4. — С. 26—30.
192. Ходот В.В., Иванов Б.М., Фейт Г.Н. Внезапные выбросы угля и газа. Пути решения проблемы // Уголь.- 1976.- № 10.- С. 13-19.
193. Христианович С.А. О волне выброса // Изв. АН СССР. ОТН.- 1953. № 12.- С. 1679-1688
194. Христианович С.А. О волне дробления // Изв. АН СССР. ОТН.- 1953. № 12.- С. 1689-1699
195. Христианович С.А. Распределение давления газа вблизи движущейся свободной поверхности угля // Изв. АН СССР. ОТН.- 1953. № 12.- С. 1673-1679
196. Христианович С.А., Гальперин В.Г., Миллионщиков М.Д., Симонов Л.А. Прикладная газовая динамика. - Ч.1. - Москва: ЦАГИ, 1948. - 145 с

197. Черницын Н.Н. Рудничный газ. Условия его выделения, его свойства и меры борьбы.- Петроград, 1917.- 192 с.
198. Чернов О.И., Пузырев В.Н. Прогноз внезапных выбросов угля и газа.- М.: Недра, 1979.- 296 с.
199. Шабаров А.Н., Цирель С.В. Обеспечение геодинамической безопасности при подземной разработке месторождений// Горный журнал.- 2017.- №9.- С. 65–70
200. Шадрин А.В., Чугулев А.О. Автоматизированный дифференцированный прогноз различных типов газодинамических явлений в угольных шахтах // Вестник Научного центра.- 2010.- №2.- С. 45-60
201. Шепелева С. А. Совершенствование метода прогноза потенциально выбросоопасных зон в угольных пластах: Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук [Неопубл] .- М., 2011.- 136 с.
202. 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.
203. Штеренберг Л.Е., Яблоков В.С. Особенности строения угольных пластов Донбасса, подверженных внезапным выбросам // Научные исследования в области борьбы с внезапными выбросами: угля и газа. - М.,1958.- С. 367-387.
204. Юдковский В.А. Влияние литологического состава пород и мощности непосредственной кровли на проявление выбросоопасности пласта // Уголь Украины.- 1980.- № 8.- С. 34-35.
205. Яковлев Д.В., Мулев С.Н. Опыт применения многофункциональной геофизической аппаратуры АНГЕЛ-Мв угольной и рудной промышленности / Д.В. Яковлев, // Уголь .— 2014 .— №10 .— С. 16-21



206. Якутпрониалмаз: Отчет о результатах выполнения ИТУ [неопуб.]. - Мирный, 2014.
207. Ямкин М.А., Сафиуллина Е.У. Оценка соответствия результатов компьютерного моделирования притока жидкости к трещине гидроразрыва пласта реальным данным // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 3. 210–217.
208. Caufield B. Discussion of the paper by G.S. Rice on “Introductory notes on origin of instantaneous outbursts of gas in certain coal mines of Europe and Western Canada // Trans. Am. Inst. Min. Met. Engrs.- 1931.- № 94.- Pp. 102-136.
209. Chen K. A new mechanistic model for prediction of instantaneous coal outbursts - Dedicated to the memory of Prof. Daniel D. Joseph // International Journal of Coal Geology.- 2011.- № 87(2).- Pp. 72–79.
210. Dong G., Liang X., Wang Q. A New Method for Predicting Coal and Gas Outbursts // Shock & Vibration.- Vol. 1.- 2020.- <https://doi.org/10.1155/2020/8867476>
211. Economides M., Oligney R., Valkó P. Unified fracture design (bridging the gap between theory and practice). – Texas: Orsa Press Alvin, 2004. – 316 p.
212. Economides M.J. Modern fracturing – enhancing natural gas production. – Houston: Energy Tribune Publ. Inc., 2007. – 531 p.
213. 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.
214. Hu Q.-T., Zhou S.-N., Zhou X.-Q. Mechanical mechanism of coal and gas outburst process // Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society.- 2008.- Vol. 33 № 12.- Pp. 1368-1372
215. Jarlier M. The mechanism of outbursts // Revue de l'Industrie Minerale.- 1936.- №361.- Pp. 601-613.

216. Koziel K., Janus J. Force Exerted by Gas on Material Ejected During Gas-geodynamic phenomena. Analysis and Experimental Verification of Theory // Archives of Mining Sciences.- 2022.- Vol. 67, No. 3.- Pp. 491–508.
217. Koziel K., Skoczylas N., Soroko K., Gola S. Gas and Dolomite Outbursts in Ore Mines—Analysis of the Phenomenon and the Energy Balance // Energies.- 2020.- Vol. 13, Iss. 11. - DOI: 10.3390/en13112999
218. Liang B., Zhang M., Pan Y., Wang L. Theory of instability of flow fixation coupling for coal and gas outbursts // Mei Tan Hsueh Pao (Journal of China Coal Society).- 1995.-№ 1
219. Pajdak A., Kudasik M. Structural and Textural Characteristics of Selected Copper-Bearing Rocks as One of the Elements Aiding in the Assessment of Gasogeodynamic Hazard // Studia Geotechnica et Mechanica.- 2017.- Vol. 39, No. 2.- Pp. 51–59.
220. Su S., Wang L., Wu S., Zhao Y., Wang C., Shu L. A data-driven method approach for prediction of coal seam gas content combining feature selection and machine learning // Engineering Applications of Artificial Intelligence.- 2025.- Volume 160, Part C.- 112000.- <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.112000>.
221. Telfer W.H. Discussions of Rowan's paper on "An outburst of coal and firedamp at Valley Field Colliery, Newmills, Fife" // Trans. Inst. Min. Engrs.- 1912.- № XLII.- Pp. 274-287.
222. Vysoton N. G., Kosyreva M.A., Leyzer V.I., Aksenov Z.V. Design rationale for engineering multipurpose bench for physical simulation of geomechanical processes in secondary stress fields under conditions of mining with convergent geotechnologies // Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal) .– 2019 .– №10.– Pp. 131-135
223. Wang L., Cheng Y., Wang L., Guo P., Li W. Safety line method for the prediction of deep coal-seam gas pressure and its application in coal mines // Safety Science.- 2012.- Vol. 5, Is. 3.- <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.09.022>
224. Zhang J., Li X., Yang F., Xu T., Zheng C., Miao Z., Zhang J. Analysis of Coal Seam Gas Emission Based on Mine Gas Drainage Statistics // IOP Conf.

Series: Earth and Environmental Science.- 2019.- №384.- doi:10.1088/1755-1315/384/1/012163

225. Zhao, Y., Song, D., Qiu, L. et al. An efficient coal and gas outburst hazard prediction method using an improved limit equilibrium model and stress field detection // Int J Coal Sci Technol.- 2025.- Volume 12, №23.- <https://doi.org/10.1007/s40789-025-00748-7>

226. Zhou S.-N., He X.-Q. Rheological hypothesis of coal and methane outburst mechanism // Journal of China University of Mining & Technology.- 1991.- №1

227. Zykov V.S., Lee H.U. About possibilities to improve current outburst hazard prediction based on updated mechanism of coal and gas outburst // Mining Report.- 2016.- № 152(2).- Pp.161–17

228. Щерба В. Я. Разработка эффективных способов и технических средств борьбы с газодинамическими явлениями в калийных рудниках: диссертация ... доктора технических наук [неопубл.- ]. – М., 2006. – 282 с.

229. Рекомендации по безопасному ведению горных работ на склонных к динамическим явлениям угольных пластах: нормативные документы в сфере деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Утв. Приказом от 21.08.2015 № 327 [эл. изд.]. – <https://docs.cntd.ru/document/456089946>

230. Зыков В.С., Денисенко С.И., Трусков С.Е., Славолюбов В.В. Физические основы газозлектромагнитного метода текущего контроля за выбросоопасностью // Вестник КузГТУ. 2004. №2. С.33-33.

231. Зыков В.С. К вопросу контроля за выбросоопасностью при реализации многофункциональной системы безопасности // Маркшейдерский вестник. №1. 2016. С. 57-62.

232. Чуприн К. Э., Мансуров В. А., Бабкин Е. А., Еременко В. А., Косырева М. А. Исследование влияния взрывов скважинных и шпуровых зарядов взрывчатых веществ на целики и вмещающий массив выработок в условиях комбинированной открыто-подземной разработки месторождения

Джеруй // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 7. – С. 5–23.

233. Зыков В. С. Лихоузов А. А. Определение направлений и параметров разведочных и прогнозных скважин перед вскрытием склонных к внезапным выбросам угля и газа пластов // Маркшейдерский вестник.– 2014.– №6(103).– С. 14-18

234. Методические указания по прогнозу удароопасности и оценке состояния участков угольных пластов, контролю эффективности профилактических мероприятий при помощи геофизической аппаратуры типа АЭШ-1 // Научно – исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ», Санкт-Петербург, 2012.

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

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

## Показатели и характеристики зарегистрированных внезапных выбросов за 2013-2023 гг.

№ п/п	Дата	Максимальная концентрация метана, %	Время проветривания, мин.	Объём выделенного газа, м куб.	Объём выброшенной породы, м куб.	Барометрическое давление, мм рт. ст.	Мощность газоносного слоя, м	Мощность газопорного слоя, м	Абсолютная отметка, м	Видимость геологического нарушения	Локализация
1	15.06.2013								-790	0	
2	01.11.2013								-790	0	
3*	04.12.2013	4,0	7			728			-791	0	
4	30.03.2015	5,0	15	372,0	6,0	718	0,5	0,9	-813	0	ПК
5	05.09.2015					727			-790	0	
6	12.04.2017	5,0	30	150,0	0,4	710	0,4	0,1	-809	1	ПК
7	07.05.2017	0,5	5	992,0	16,0	716	1,8	0,4	-811	1	П
8	17.06.2017	5,0	30	230,0	42,6	724	2,0	1,1	-813	1	П
9	27.06.2017	5,0	15	4249,0	475,0	722	3,4	1,1	-814	1	П
10	05.09.2017	0,5	6	195,9	1,5	714	1,7	0,6	-814	1	П
11	27.10.2017	7,6	18	452,9	5,5	725	3,0	0,2	-815	0	П
12	09.11.2017								-814	0	
13	15.11.2017	4,0	26	408,9	5,6	729	1,8	0,4	-816	0	ПК
14	20.11.2017	2,6	37	336,2	82,1	719	2,4	1,3	-814	0	ПК
15	25.11.2017	4,5	35	487,5	78,4	725	2,4	1,6	-815	0	ПК
16	04.02.2018	5,0	57	1432,9	52,0	737	1,8	1,3	-825	0	К
17	26.02.2018	3,3	21	140,8	64,8	734	1,8	0,2	-824	0	К
18	07.03.2018	31,8	344	2013,1	180,0	731	1,8	0,2	-818	0	К
19	11.04.2018	67,5	80	7433,0	409,0	732	3,5	2,2	-823	0	К
20	04.06.2020	3,3	10		16,0		2,4		-820	0	К
21	05.06.2020	4,5	30		11,1		2,5		-820	0	К
22	07.06.2020	1,7	39		13,2		2,3		-820	0	К
23	10.06.2020	3,2	42		82,3		2,0		-816	0	П
24*	12.06.2020	5,5	17	264,3	80,8		2,4		-827	0	К
25*	10.08.2020	4,2	15	85,3	84,0		2,1		-822	0	К
26*	04.09.2020	4,2	15	124,2	28,0		3,1		-835	0	К
27*	16.11.2020	5,4	53	118,5	66,0		2,7	0,2	-812	1	К
28	18.01.2022	24,0	22		225,0		3,2		-865	0	ПК
29	26.04.2022	18,4	70	1653,4	336,0		2,5	0,7	-875	1	П
30*	07.05.2022	28,0	35				2,5	0,7	-873	0	П
31	11.05.2022	28,0	16		176,4		2,5	0,7	-875	0	П
32	23.06.2022	0,8	53		37,0		2,3	1,0	-875	1	П
33*	12.10.2022	1,4	14		17,0		2,0	1,3	-890	1	К
34*	11.12.2022	0,6	1		40,0		1,8	2,8	-857	0	П
35	05.01.2023	1,9	55		238,0		2,2	0,4	-900	0	ПК
36	14.01.2023	4,8	30		162,5		2,5	0,4	-900	0	ПК

№ п/п	Дата	Макси- мальная концент- рация метана, %	Время провет- рива- ния, мин.	Объём выде- ливше- го газа, м куб.	Объём выбро- шенной породы , м куб.	Баромет- рическое давление, мм рт. ст.	Мощность газоносного слоя, м	Мощность газоупорно- го слоя, м	Абсолют- ная отметка, м	Видимость геологич- еского нарушения	Локали- зация
37	31.03.2023	7,6	30	566,4	104,0		3,1		-909	1	К
38	06.04.2023	0,7	30	13,0	104,0		3,1		-910	1	К
39	08.04.2023	2,9	30	298,0	104,0		3,1		-910	1	К
40	09.04.2023	2,1	30	5,0	104,0		3,1		-910	1	К
41	13.04.2023	0,1	30	32,0	104,0		3,1		-910	1	К
42	15.04.2023	0,1	30	21,0	104,0		3,1		-910	1	К
43	16.04.2023	5,0	30	365,0	104,0		3,1		-910	1	К
44	18.04.2023	0,2	30	8,1	104,0		3,1		-911	1	К
45*	13.08.2023	3,2	28	231,0	87,0		3,5		-905	1	ПК
46*	13.09.2023	1,0	3	50,3	115,0		3,0		-907	1	К
47*	23.09.2023	6,4	27	36,1	104		0,5		-923	1	К
<b>Вариация, %</b>		<b>163</b>	<b>162</b>	<b>201</b>	<b>585</b>	<b>1</b>	<b>32</b>	<b>79</b>	<b>5</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Открытое акционерное общество  
НАУЧНО – ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГОРНОЙ  
ГЕОМЕХАНИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА  
– МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
ВНИМИ

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор  
ОАО «ВНИМИ»  
докт. техн. наук., проф.,

Д.В.Яковлев  
2012 г.



## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**по созданию систем контроля состояния горного  
массива и прогноза горных ударов как элементов  
многофункциональной системы безопасности  
угольных шахт**

(во исполнение требований п. 41 ЕПБ)

Санкт-Петербург 2012

Журнал регистрации результатов прогноза ВЫБРОСОПАСНОСТИ методом ЕЭМИИ

Шахта: ..... Пласт: .....  
Выработка: ..... Дата: ..... смена: ..... Геофизический прибор ANGEL-M. № .....  
Вид измерения: .....

Дата, смена	Положение забоя	Номер точки замера	Мощность пласта, м	Количество замеров	t [s]	Средние показатели					Категория ВЫБРОСОПАС НОСТИ
						A [mkV]	L1 [mkV]	L10 [mkV]	Var. A [%]	B	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Прогноз провёл \_\_\_\_\_  
С результатами прогноза ознакомлен начальник участка АБ \_\_\_\_\_  
Помошник начальника участка АБ по Дя \_\_\_\_\_



Примеры заключений экспертизы промышленной безопасности, где  
используются результаты диссертационного исследования



Общество с ограниченной ответственностью  
«Научный проектно-экспертный институт «Недра»  
**ООО «НПИ «Недра»**  
630009, Новосибирская обл., г. Новосибирск,  
ул. Никитина, д. 20, офис 910  
ИНН 4205325060; КПП 540501001; ОГРН 1164205057136  
E-mail: nedra-npi@mail.ru; Тел: 8-960-906-42-00

**Заключение  
экспертизы промышленной безопасности №025Н-2024-ТП(э)-166**

*на документацию на техническое перевооружение опасного  
производственного объекта – Шахта угольная  
«Чертинская-Коксовая», I класса опасности,  
регистрационный номер А68-00204-0013*

**«Техническое перевооружение опасного производственного объекта  
ООО «ММК-УГОЛЬ» «Шахта «Чертинская- Коксовая».  
Проект дегазации выемочного участка 456»**

Директор  
ООО «НПИ «Недра»



С.В. Самохин  
01 апреля 2024г.

2024

Общество с ограниченной ответственностью

**«ЭПБ-Инжиниринг»**

654066, г. Новокузнецк, ул. Гряды, д. 17А, офис 413

тел. 8-951-615-87-83

e-mail: epb.ing@yandex.ru

ИНН 4217210794

ОГРН 1244200006291



**Заключение № 106-2025/ТП**

**экспертизы промышленной безопасности**

документации на техническое перевооружение опасного производственного

объекта – Шахта угольная (филиал «Шахта Ерунаковская-VIII»),

I класс опасности, регистрационный номер А68-01313-0060

**«Техническое перевооружение опасного производственного объекта**

**Шахты угольной (филиал «Шахта Ерунаковская-VIII»)**

**АО «ОУК «Южкузбассуголь» в части осуществления прогноза динамических  
явлений в очистном забое 48-9» 41/25-ПД-2025**

Рег. № 42-ТП-\_\_\_\_\_ -2025

Директор

ООО «ЭПБ-Инжиниринг»

  
А.А. Калашников

«29» сентября 2025 г.



г. Новокузнецк  
2025



Общество с ограниченной ответственностью  
«Научный проектно-экспертный институт «Недра»  
ООО «НПИ «Недра»  
630009, Новосибирская обл., г. Новосибирск,  
ул. Никитина, д. 20, офис 910  
ИНН 4205325060; КПП 540501001; ОГРН 1164205057136  
E-mail: nedra-npi@mail.ru; Тел: 8-960-906-42-00

**Заключение**  
**экспертизы промышленной безопасности №067Н-2023-ТП(э)-141**

*на документацию на техническое перевооружение опасного  
производственного объекта – Шахта угольная «Денисовская»,  
I класса опасности, регистрационный номер А73-01612-0001*

**«Техническое перевооружение опасного производственного объекта  
«Шахта угольная «Денисовская» АО ГОК «Денисовский» в части  
организации системы непрерывных сейсмических наблюдений  
GITS с целью прогноза динамических явлений»**



Директор  
ООО «НПИ «Недра»  
С.В. Самохин  
20 июля 2023г.

2023