

Л.Л. КАУФМАН, Б.А. ЛЫСИКОВ

**СЕЙСМИЧЕСКИЕ РИСКИ
ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ ПОРОД**
Основные принципы управления рисками
(обзор зарубежного опыта)

*Под общей редакцией
Л.Л. Кауфмана*

Норд-Пресс
Донецк – 2010

УДК 622.81
ББК 33.1
К 30

*Рекомендовано к печати Ученым советом
Донецкого национального технического университета
(протокол № 6 от 10 сентября 2010 г.)*

Рецензенты:

Алексеев А.Д. – директор института физики горных проблем НАН Украины, член-корр. НАН Украины, лауреат государственной премии Украины, докт. техн. наук, профессор.

Усаченко Б.М. – зав. отделом механики горных пород ИГТМ им. М.С. Полякова НАН Украины, г. Днепропетровск, лауреат государственной премии Украины, академик Академии горных наук Украины, докт. техн. наук, профессор.

Шашенко А.Н. – зав. каф. «Строительство и геомеханика» Национального горного университета, г. Днепропетровск, лауреат государственной премии Украины, академик Академии горных наук Украины, докт. техн. наук, профессор.

Кауфман Л.Л., Лысиков Б.А.

К 30 Сейсмические риски внезапных выбросов пород: [монография] Под общ. ред. Л.Л. Кауфмана — Донецк: Норд-Пресс, 2010. — 418 с.
ISBN 978-966-380-458-3

В книге рассмотрены сейсмические опасности, возникающие при ведении горных работ на большой глубине, а также риски, связанные с их проявлениями – внезапными выбросами пород, вызванными высвобождением энергии напряжений массива. В главе 1 описаны общие особенности поведения пород в этих условиях, в главе 2 – природа и механизм возникновения внезапных выбросов пород, их характерные черты и возможные классификации, предложенные разными авторами.

Особое внимание уделено описанию в главе 3 стратегических и тактических мер, предотвращающих внезапные выбросы пород и снижающие тяжесть их последствий. В главе 4 рассмотрены современные системы мониторинга сейсмической обстановки, позволяющие выявить и оценить предупреждающие признаки внезапных выбросов. Сделан обзор различных аналитических подходов к прогнозированию выбросов и риска их возникновения, а также методов оценки опасности сейсмических событий в районе производства горных работ.

Заключительная, 5 глава посвящена ознакомлению с практическим опытом крупного горнорудного района Соед. Штатов, Idaho, США, расположенного в сейсмоопасных и выбросоопасных условиях. Приведенные примеры управления выбросами на шахтах района, позволяют читателю составить общее представление о проблемах, связанных с подземными работами в такой обстановке и их геотехническими рисками.

Книга может быть полезна инженерно-техническим работникам, студентам горных специальностей, другим читателям, интересующимся вопросами, затронутыми авторами.

УДК 622.81
ББК 33.1

Kaufman L.L., Lisikov B.A. Seismic risks of rockbursts (The main principles) / – Donetsk: Nord-Press, 2010. – 418 p.

ISBN 978-966-380-458-3

© Л. Л. Кауфман, Б. А. Лысиков, 2010
© Норд-Пресс, 2010

This book reviews seismic hazards and rockburst risks at deep mining levels when seismic energy of high stresses is released. Chapter 1 describes common features of rock mass behavior in these conditions, Chapter 2 – nature and mechanism of rockbursts occurrence, seismic events classifications that was offered by different authors.

In the Chapter 3 the special attention is paid to strategic and tactical measures for prevention and mitigation of rockburst consequences. Chapter 4 describes contemporary monitoring methods of seismic conditions, preventing signs of rockbursts, analytic approaches for rockburst prediction and risk assessment.

The final Chapter 5 dedicates to practice experience of mining district Coeur d'Alene, Idaho, USA in seismic hazard and rockburst conditions. The chapter gives the general concept of seismic risk problems in specific situation and describes many examples of risk management methods.

This book will be useful for experts, students and general readers who are interesting in mining and civil underground construction.

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	9
Глава 1 Поведение горных пород в условиях высоких напряжений	13
1.1. Общие сведения.....	13
1.2. Прочность и напряженность породных масс.....	27
1.3. Поведение пород в поле напряжений.....	39
1.4. Управление поведением пород в условиях высоких напряжений.....	53
Глава 2 Природа и механизм внезапных выбросов пород	62
2.1. Общие сведения.....	62
2.2. Классификация сейсмических событий.....	77
2.3. Механизм сейсмических событий и внезапных выбросов пород.....	99
2.3.1. Ранние теории природы внезапных выбросов пород.....	99
2.3.2. Механизм возникновения внезапных выбросов пород.....	103
2.4. Региональные аспекты сейсмической активности, индуцированной горными работами.....	115
2.5. Пример внезапного выброса пород в выработке туннельного типа.....	128
Глава 3 Стратегические и тактические меры управления внезапными выбросами пород	135
3.1. Общие сведения.....	135
3.2. Стратегические меры предотвращения внезапных выбросов пород.....	140
3.3. Тактические меры предотвращения внезапных выбросов пород.....	155

3.3.1.	Основные принципы дизайна податливой крепи подземных полостей.....	155
3.3.2.	Податливая металлическая штанговая крепь.....	159
3.3.3.	Усовершенствование технологии применения набрызгбетона.....	176
3.3.4.	Применение разгрузочного взрывания.....	189
3.4.	Комплекс противовыбросных мер на шахте Big Bell.....	219
3.5.	Экспериментальные способы предотвращения внезапных выбросов пород.....	234
Глава 4	Мониторинг, прогнозирование и оценка сейсмического риска внезапных выбросов пород.....	245
4.1.	Общие сведения.....	245
4.2.	Мониторинг выбросоопасности пород.....	246
4.3.	Расслоение разведочных кернов на диски.....	253
4.4.	Прогнозирование возникновения и опасности внезапных выбросов пород.....	255
4.5.	Оценка риска сейсмической опасности на шахтах Австралии.....	264
4.5.1.	Оценка сейсмической опасности.....	264
4.5.2.	Оценка риска выбросоопасности пород.....	285
4.5.3.	Оценка подверженности риску обрушения пород.....	300
4.6.	Оценка сейсмического риска на шахтах Южной Африки.....	322
Глава 5	Опыт работы шахт района Coeur d'Alene в условиях выбросоопасности пород.....	341
5.1.	Общие сведения.....	341
5.2.	Стратегические меры управления внезапными выбросами пород.....	380
5.3.	Тактические меры управления внезапными выбросами пород.....	383
5.4.	Основные сведения о сейсмических событиях в выработках туннельного типа.....	395

5.4.1. Транспортный горизонтальный квершлаг гор. 6020.....	395
5.4.2. Участковые наклонные ramпы гор. 5300.....	401
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	411
БИБЛИОГРАФИЯ	412

C O N T E N T S

	Page
INTRODUCTION	9
Chapter 1 Hard rock massive behavior in high stress conditions	13
1.1. Overview.....	13
1.2. Strength and stresses of hard rocks.....	27
1.3. Rock behavior in stresses field.....	39
1.4. Rock behavior management in high stress conditions.....	53
Chapter 2 Nature and mechanism of rockbursts	62
2.1. Overview.....	62
2.2. Seismic events classification.....	77
2.3. Mechanism of seismic events and rockbursts.....	99
2.3.1. Early theories of rockbursts nature.....	99
2.3.2. Mechanism of rockbursts.....	103
2.4. Regional aspects of mining induced seismicity.....	115
2.5. Examples of rockbursts in tunnel type openings.....	128
Chapter 3 Strategic and tactical methods of rockbursts management	135
3.1. Overview.....	135
3.2. Strategic methods of rockburst prevention and mitigation.....	140
3.3. Tactical methods of rockburst prevention and mitigation.....	155
3.3.1. The main principles of yielding support design of underground openings.....	155
3.3.2. Yielding rockbolts.....	159
3.3.3. Technology improvements of shotcrete application..	176
3.3.4. Destress blasting application.....	189
3.4. Rockbursts prevention at Big Bell mine.....	219
3.5. Experimental methods of rockbursts prevention.....	234

Chapter 4	Monitoring, prediction and seismic risk assessment	245
4.1.	Overview	245
4.2.	Seismic events monitoring	246
4.3.	Core diking	253
4.4.	Rockbursts and seismic hazards prediction	255
4.5.	Seismic hazard assessment at Australian mines	264
4.5.1.	Seismic hazard assessment	264
4.5.2.	Rockburst hazard assessment	285
4.5.3.	Risk exposure of rockfalls estimation	300
4.6.	Seismic risk assessment at South African mines	322
Chapter 5	Mining experience of Coeur d’Alene district	341
5.1.	Overview	341
5.2.	Strategic methods of rockburst management	380
5.3.	Tactical methods of rockburst management	383
5.4.	The main knowledge of seismic events at tunnel type openings	395
5.4.1.	The 6020 level crosscut	395
5.4.2.	The 5300 level ramp development	401
	CONCLUSION	411
	BIBLIOGRAPHY	412

ВВЕДЕНИЕ

Внезапные выбросы пород – неожиданное и опасное явление, с которым горные работы – добывающие и строительные – все более часто сталкиваются при углублении мест расположения подземных структур разного назначения. По характеру событий, механизму возникновения, наносимому ущербу, внезапные выбросы все чаще признаются сейсмическими событиями, т.е. подземным эквивалентом малых землетрясений.

Становится или нет сейсмическое событие внезапным выбросом, определяется следующими факторами:

- количеством кинетической энергии события;
- расстоянием от центра события до подземной экскавации;
- состоянием напряжений вокруг экскавации;
- состоянием и качеством окружающих пород;
- качеством крепи подземных полостей.

В последние десятилетия в горнодобывающих районах расширилось применение мониторинга и цифровых систем, идентифицирующих расположение, время возникновения, продолжительность, выделяемую энергию и другие компоненты сейсмического события. Системы мониторинга акустической эмиссии позволили выявлять и регистрировать образование трещин, вызванных природным напряженным состоянием породного массива и индуцированных горными работами. Методами геофизической разведки определяются места расположения и параметры неоднородностей массива, с которыми часто связаны возникновение и масштабы сейсмического события.

Проведенные исследовательские работы и результаты практического опыта направлены на прогнозирование поведения породных масс, вызванного экскавацией при добычных и строительных работах. Интегрированный подход, основанный на компьютерном моделировании состояния массива во-

круг подземных полостей и на регистрации и анализе сейсмичности, позволяет разрабатывать дизайн подземных объектов с учетом угрозы внезапных выбросов пород, предотвращая их или снижая возможный ущерб последствий.

Предлагаемая читателю книга рассматривает широкий круг вопросов, посвященных сейсмическим рискам внезапных выбросов пород. С этой целью в 1-й главе излагаются общие особенности поведения горных пород в условиях высоких напряжений массива, поскольку именно их потенциальная энергия высвобождается в ходе внезапного и насильственного отторжения выброшенных породных фрагментов. Природа и механизм возникновения внезапных выбросов, анализируются во 2-ой главе, где, в частности, приведены определения и принципы классификации выбросов, предложенные разными авторами.

Особое внимание уделено описанию в 3-ей главе стратегических и тактических мер управления внезапными выбросами пород. За годы борьбы с этим грозным явлением предложены и проведены на практике долгосрочные и затрагивающие большие площади подземного пространства стратегические мероприятия, позволяющие снизить общий уровень сейсмичности района. Проведены также испытания локальных способов снижения напряжений массива и укрепления породных слоев, окружающих зону экскавации.

В главе 4 описаны современные системы мониторинга сейсмической обстановки подземных работ, позволяющие выявить и оценить предупреждающие признаки внезапных выбросов пород. Сделан обзор различных аналитических подходов к прогнозированию выбросов, приведена методика оценки опасности сейсмических событий и расчета уровня риска выбросоопасности пород, в которых проводится экскавация подземных полостей.

Заключительная 5-я глава рассматривает опыт работы крупного горнорудного района Coeur d'Alene, Idaho, США, где за долгие десятилетия накоплен опыт работы в выбросо-

опасных условиях, позволяющий читателю составить общее представление о проблемах, связанных с сейсмической обстановкой и угрозами, которые она создает.

Авторы старались изложить рассматриваемые вопросы достаточно доступно, сосредотачиваясь только на основных целях и не углублялись в сложные теоретические вопросы, относящиеся, например, к механике горных пород, компьютерному моделированию подземных процессов, выбору параметров горных работ и т.д. Во всех этих случаях авторы рекомендуют обращаться к соответствующей специальной литературе.

Хотелось бы также обратить внимание читателя на некоторые трудности, связанные с переводом текст , относящихся к разным странам мира и отраслям горного производства. Принятая в них терминология производственных элементов и процессов, несмотря на одинаковую суть, может различаться даже, если она формулируется на одном языке. Так, например, различными терминами обозначаются выработки, служащие для развития горных работ – вскрытия и подготовки новых запасов месторождения. Поэтому при переводе исходных материалов и их систематизации авторы предлагаемой книги старались унифицировать специфические термины, описывая горные работы различных регионов мира.

С другой стороны следовало бы учесть, что внезапные выбросы пород происходят как на рудных, так и на угольных шахтах, где применяются различные термины для обозначения аналогичных понятий. Издавая книгу в регионе сосредоточения угольной промышленности, авторы предполагали, что основными ее читателями будут специалисты и студенты этой отрасли и поэтому применяли привычную для них терминологию, понятную эксплуатационному и строительному угольному персоналу.

Еще одной трудностью, связанной с переводом на русский язык специальных терминов, относящихся, в частности, к зарубежным рудным шахтам, служит название «a stope».

Его рутинное значение переводится, как «добычной блок», «выемочная камера», «очистное производство» (словарь «Мультиран», <http://www.multiran.ru>). Учитывая вариативность этих значений, а также звучание термина, авторы решили перевести его словом «уступ», широко применяемым в русскоязычной технической литературе при описании открытого способа горных работ, но реже используемым для подземной экскавации.

Наконец, читатель заметит, что в книге понятие «дизайн» применяется вместо привычного для отечественной практики слова «проект», которым обозначается текстовая и графическая техническая документация, служащая основой для сооружения запланированного объекта и определяющая содержание и последовательность операций строительства. Такая замена термина объясняется тем, что за рубежом (по крайней мере, в англоязычных странах) под словом «проект» понимаются усилия, предпринимаемые и реализуемые как при строительстве, так и при осуществлении других намеченных целей, а «дизайн», при необходимости, входит в качестве одного из частей в состав «проекта».

Книга может быть полезна научно-техническим работникам, студентам горных специальностей, другим читателям, интересующимся вопросами не только горнодобывающей деятельности, но и подземного строительства на большой глубине, в частности, таких гражданских объектов, как транспортные и другие туннели, научные лаборатории, хранилища радиоактивных отходов и т.д., которые постоянно испытывают трудности, встречаясь при выполнении работ с сейсмической опасностью.

Глава 1. Поведение горных пород в условиях высоких напряжений

1.1 Общие сведения

Силовое поле, прикладываемое к жидкости или газу, называется давлением, прикладываемое к твердому телу оно называется напряженным состоянием (state of stress). Давление в точках жидкости или газа всегда одинаково и равномерно распределено в каждом направлении (т.е. оно гидростатично). Но напряжение в твердом теле, в частности, породных массах, варьируется в зависимости от направления, т.е. является так называемой тензорной величиной.

Важно понять различие между первичными напряжениями, существующими до начала горных работ, и напряжениями, индуцированными горными работами. В первом случае напряжения, которые существуют в породах, относятся к природным (virgin) или напряжениям в массиве (in-situ). Для аналитических целей их вертикальные и горизонтальные компоненты рассматриваются отдельно. Вертикальные напряжения рассчитываются средствами теории упругости для каждой конкретной глубины залегания пород. В твердых породах вертикальные напряжения обычно являются прямолинейной функцией веса породной колонны над рассматриваемой подземной полостью. Так, средний градиент вертикальных напряжений (прирост на 1 м глубины) для пород типа кварцитов или полевого шпата равен 0,026 МПа/м. В литературе вертикальные напряжения могут называться гравитационными, литологическими или напряжениями от веса покрывающих пород.

Определение природных горизонтальных напряжений более сложно. Так, в Северной Америке (США и Канаде) горизонтальные напряжения обычно выше, чем они прогнозируются традиционным анализом упругости, не одинаковы в разных направлениях и специфичны для каждого места ана-

лиза. Как правило, считается, что горизонтальное напряжение максимально в одном направлении и уменьшается до минимума в направлении, перпендикулярном максимальному.

Средний градиент горизонтальных напряжений специфичен для конкретного географического района. Так, для Канадского геологического щита этот градиент определяется раздельно для глубины менее и более 900 м: для глубины 0-900 м он рассчитывается по формуле:

$$\text{средний градиент} = 9,86 \text{ МПа} + 0,0371 \text{ МПа/м},$$

а для глубины 900-2200 м по формуле:

$$\text{средний градиент} = 33,41 \text{ МПа} + 0,011 \text{ МПа/м}.$$

Интенсивность и ориентация природных напряжений могут значительно измениться, когда шахта или место строительства подземной структуры находится возле крупного геологического нарушения.

Примером может служить шахта Laky Friday, Idaho, США (рис. 1.1), расположенная возле нарушения Osborn, сброс которого прослеживается на расстоянии 24 км. Здесь природные напряжения классифицируются, как тектонические, и часть их, сохранившаяся после разгрузки природными силами, называется остаточным напряжением.

Напряжения, индуцированные горными работами, имеют два различных вида. Первое из них – статическое, подобное природным напряжениям массива, является относительно стационарным. Второе – динамическое - перемещается через породы со скоростью звука. Динамическое напряжение обычно обозначается, как сейсмическое.

При экскавационных работах напряжения в породах, окружающих полость, увеличиваются. Это увеличение (индуцированное напряжение) может быть продемонстрировано на примере строительства вертикального ствола в поле горизон-

a)

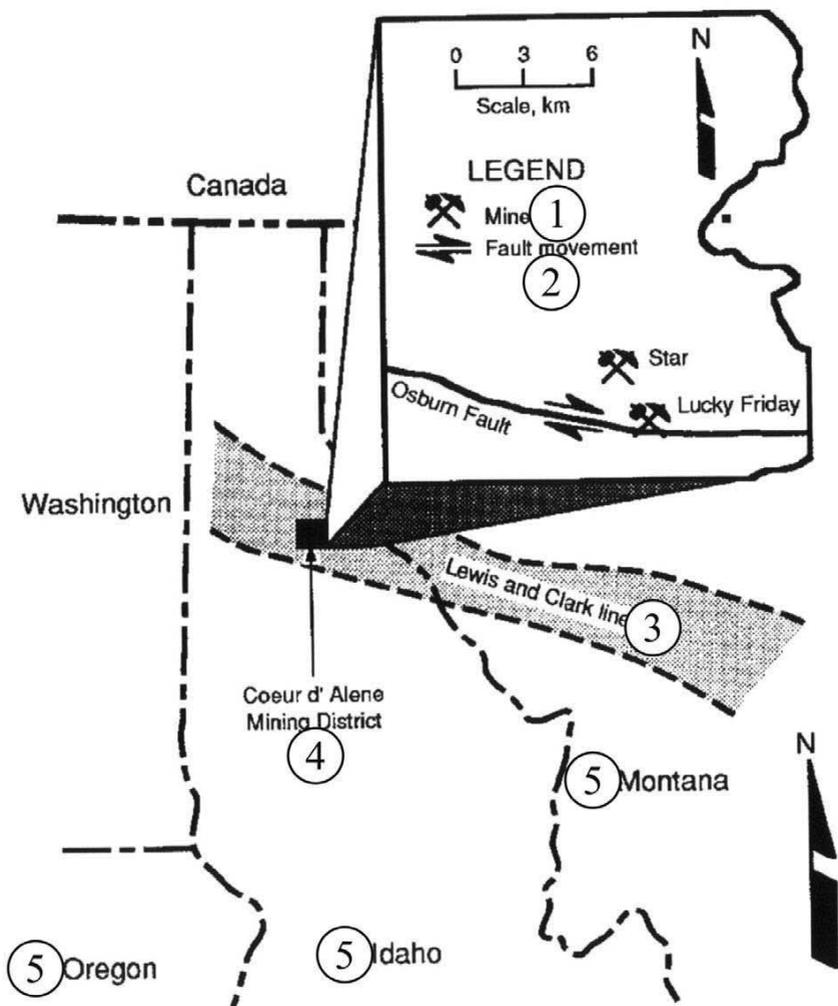


Рис. 1.1. Расположение и модель рудного тела шахты Lucky Friday

1 – шахта; 2 – сдвигение нарушения; 3 – нарушенная зона; 4 – район Coeur d'Alene; 5 – штаты

б)



Рис. 1.1. Расположение и модель рудного тела шахты Lucky Friday (окончание)

тальных напряжений. Согласно анализу упругости, периферические напряжения на окружности ствола равны двойному горизонтальному напряжению, которое существовало до начала строительства.

Магнитуа дополнительного индуцированного напряжения Q_i на окружности ствола и на любом от него расстоянии в породах может быть рассчитана по простой формуле:

$$Q_i = Q \left[\frac{r^r}{(r + y)^2} \right],$$

где Q – начальное напряжение;

r – радиус ствола;

y – расстояние от породной стены ствола.

На рис. 1.2 показаны индуцированные напряжения для ствола, пройденного в твердых породах разными способами.

Образование полостей в напряженных породах перераспределяет существующие природные напряжения и создает высокие вторичные (индуцированные), которые возникают в окрестностях экскавации. Магнитуды этих вторичных напряжений могут быть близки к прочности нетронутых пород. В таких условиях возможно разрушение пород (расслоение, падение фрагментов, внезапные выбросы).

Отношение «напряжение/прочность», одно из наиболее значимых для механического состояния пород, позволяет определить, когда запланированное подземное строительство будет происходить в высоконапряженной среде. Состояние напряжений и предельная прочность пород определяются различными геологическими факторами такими, как виды пород или их неоднородности – нарушения, изверженные вторжения, плоскости напластования. Насколько сильно напряжения в массиве воздействуют на экскавацию, зависит также от размеров и направления (ориентации) подземной полости, например, туннеля.

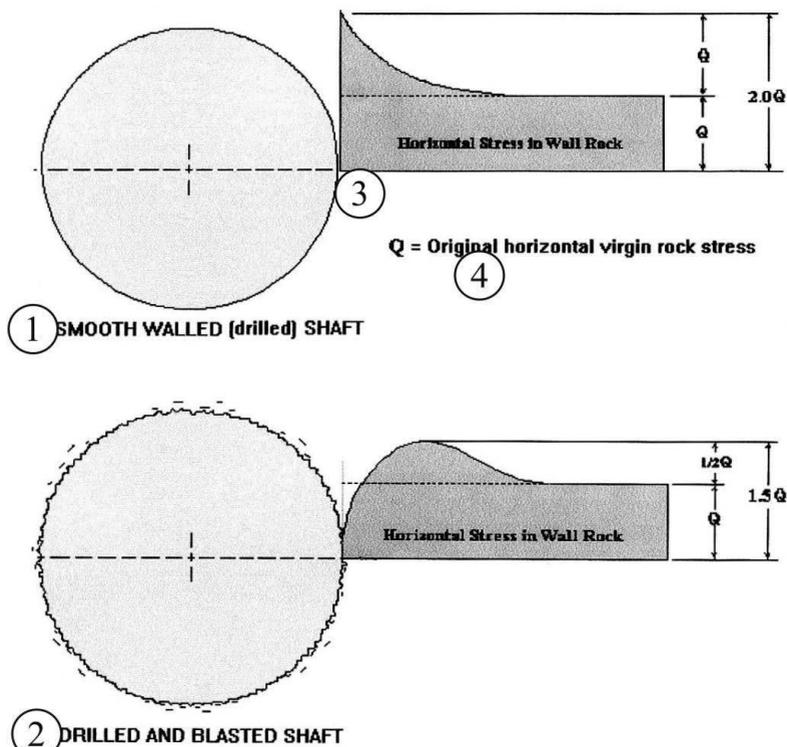


Рис. 1.2. Индуцированные напряжения вокруг ствола

1 – гладкие стены (ствол проходилс бурением); 2 – шероховатые стены (ствол проходилс буровзрывными работами); 3 – горизонтальные напряжения в породах стены; 4 – природные напряжения.

Расслоение пород, развитие трещиноватости, внезапное отторжение фрагментов – типичные явления, которые могут происходить в твердых, хрупких кристаллических породах в окрестностях полостей, подверженных высоким напряжением. Эти виды пород, например, гнейсы и граниты, сохраняют большое количество энергии напряжений, которая вызывает их разрушение подобное взрыву с осколками, отлетающими от забоя или стен экскавации. Показатель существования высоких напряжений или низкой прочности пород – образование дисков в породных кернах, получаемых при бурении раз-

ведочных скважин, когда образец керна разбивается на слои из-за высоких напряжений, ориентированных перпендикулярно оси скважины (см. главу 4).

В зоне высоких природных напряжений тангенциальные (касательные) напряжения вокруг экскавации могут быть близки к прочности пород или превышать ее. В этом случае происходит разрушение пород с интенсивностью, зависящей от сейсмической энергии, хранящейся в окружающем массиве, и количество которых определяется локальной геологией, дизайном полости, физическими особенностями породных масс. Перераспределение напряжений в окрестностях полости происходит немедленно после экскавации, процесс разрушения продолжается затем в течение нескольких часов или дней.

Когда тангенциальные напряжения превышают прочность природно трещиноватых пород, начинается развитие микротрещин, которое происходит перпендикулярно поверхности строящейся структуры и направлению тангенциальных напряжений. Зона микротрещин может варьироваться от нескольких сантиметров до нескольких метров в зависимости от магнитуды напряжений в массиве, дизайна полости, прочности породы и метода экскавации.

Шум пород – первый сигнал перераспределения напряжений и развития микротрещиноватости вокруг экскавации, который может наблюдаться специально установленной регистрирующей системой. При режиме высоких напряжений в твердых и хрупких породах часто издается сильный звук, уровень которого зависит от энергии, хранимой в массиве.

Когда породы вокруг экскавации разрушаются высоким тангенциальным сжимающим напряжением происходит их расслоение, которое выражается в образовании тонких плит, параллельных поверхности полости (рис. 1.3 а).

Если зоны микротрещин, вызванные тангенциальными сжимающими напряжениями, становятся достаточно большими по сравнению с толщиной породных слоев, последние приобретают тенденцию к прогибу или отторжению. Это соз-

дает новую, свежую поверхность породного массива и процесс повторяется, выражаясь в форме внезапного выброса. Его типичной особенностью является насильственный интенсивный характер, а результатом - соответствующий ущерб полости и ее внешний вид. Внезапный выброс создает проблемы безопасности в ходе работ, и наносит повреждения подземным структурам (рис. 1.3 б).

Сейсмические события, вызываемые горными работами, обычно связывают с нарушениями, которые почти всегда обнажаются в подземных полостях (рис. 1.3 в). Перемещения пород по нарушениям обычно невелики и часто их даже невозможно ощутить, но факт, что нарушения влияют на появление повреждений, обычно очевиден, поскольку последние бывают локализованы именно в местах обнажения нарушений.

На стадии дизайна функциональное назначение строящейся полости определяет ее размеры, форму и ориентацию, но условия строительства ограничивают возможности дизайна. Превышения прочности пород возникающими напряжениями до начала строительства трудно оценить. Даже большинство самых современных компьютерных программ не может в полном объеме прогнозировать общую стабильность пород вокруг зоны экскавации, находящейся в поле высоких напряжений. В сложном геологическом окружении разных видов пород и неоднородностей должны быть тщательно выбраны элементы дизайна и их правильные параметры.

Когда подземная полость находится в зоне напряжений массива, практическое правило механики горных пород говорит о том, что эта полость (туннель) должна быть ориентирована параллельно направлению максимальных главных напряжений, поскольку в этом случае на контур сечения полости действуют минимальные главные напряжения (см. главу 2). Полости, по возможности, должны располагаться перпендикулярно неоднородностям массива, сочленениям породных блоков и нарушениям.

a)



б)



Рис. 1.3. Расслоение пород и образование породных плит в туннеле под воздействием высоких напряжений (шахта Южной Африки, глубина 2,9 км).

в)



Рис. 1.3. Расслоение пород и образование породных плит в туннеле под воздействием высоких напряжений (шахта Южной Африки, глубина 2,9 км) (окончание)
а) начальная стадия; б) продолжение деформации; в) нарушение в месте внезапного выброса пород.

Ослабленные породные массы вокруг полости поддерживаются крепью, цель планирования которой – создание адекватного противостояния тангенциальным сжимающим напряжениям и предотвращение дальнейшего ослабления пород. В окрестностях режима высоких напряжений, где имеется риск разрушения пород, система крепи должна выполнять две функции:

- усиление расчлененных пород формируя породную арку, воспринимающую индуцированные напряжения, и минимизируя ослабленность породных масс;
- удержание разрушенных пород, скрепляя их и привязывая к массиву.

Дизайн крепи определяется сроком службы полости, размерами пролетов, магнитудой и направлениями напряжений, геологией окружающих пород. В условиях опасности высоких динамических нагрузок, вызванных потенциальной сейсмичностью массива, особое значение приобретают характеристики податливости крепи, позволяющей абсорбировать энергию, выделяющуюся во время внезапного выброса пород.

При планировании подземных работ должно учитываться влияние экскавации на окружающие породы. Количество и тип взрывчатых материалов, расположение скважин, очередность их взрывания определяют воздействие на массив, вызванное взрывом. С этой точки зрения применение буровых туннельных машин улучшает геотехническую обстановку вокруг туннеля, а их новые конструктивные решения позволяют снизить тенденцию разрушения породных слоев, граничащих с зоной экскавации. Примером таких решений служит конструкция режущей головки, атакующей породу в забое сбоку, поперек забоя, в отличие от стандартного решения прямой атаки резцов, подаваемых вперед на забой вместе с корпусом машины.

На рис. 1.4 показана режущая головка новой конструкции, состоящая из 4 рукоятей, на каждой из которых расположен один резец, что отличает ее от традиционной головки,

включающей 10 и более резцов. Рукоять 1 разрабатывает центральную часть забоя, а рукояти 2, 3 и 4, разделенные углами 120° , скалывают породу по направлению к периферии сечения. Рукояти при необходимости могут быть удалены для ремонтных работ, осмотра забоя и т.д. Срезающие силы, направленные «более тангенциально» поперек забоя, создают реактивный отпор, воспринимаемый боковыми домкратами, меньший, чем у стандартной машины.

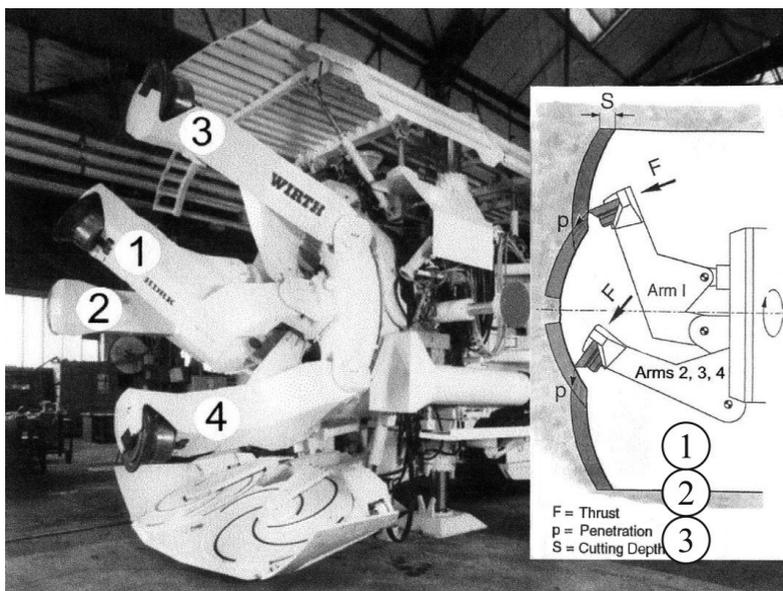


Рис. 1.4. Буровая туннельная машина со скалывающим принципом работы режущей головки

1 – срезающее усилие; 2 – проникновение; 3 – глубина среза.

Эксплуатация пород приводит к появлению индуцированных напряжений и, когда после очередного шага подземных работ эти напряжения достаточно высоки, породы, прилегающие к зоне экскавации, обрушаются, а напряжения возвращаются к исходному состоянию. Это означает, что породы, окружающие подземную полость, находятся в положении

ограниченного равновесия и продолжают деформироваться, когда предпринимается следующий шаг работ.

Такое систематическое перераспределение напряжений приводит к микросейсмичности в породных массах, которая рассеивает энергию и дает акустическую информацию о состоянии массива.

Микросейсмическая система мониторинга регистрирует места и время событий. Важно также иметь эту информацию немедленно. Операторы шахт Северной Америки обычно обязаны эвакуировать персонал при таких событиях, как ожидаемые внезапные выбросы пород, которые являются проявлениями сейсмической активности. Знание места их возникновения, а также наличие средств экстренной связи с персоналом, дают возможность спасти жизнь и сэкономить миллионы долларов.

Еще одним микросейсмическим параметром служит магнитуда события, что позволяет статистически понять и оценить природу сейсмической активности, а также прогнозировать, как часто такие события могут произойти.

Статистический анализ характеристик сейсмических событий, в частности, вероятности их возникновения, позволяет определить уровень риска для персонала шахты. Рис. 1.5 показывает, что для типичной большой рудной шахты вероятность сейсмических событий с магнитудой 4,0 составляет примерно 15% за период более 100 дней, вероятность 40% за период одного года и 100% - за 10 лет. Эти знания могут быть полезны в принятии решений дизайнера и оценки рисков, угрожающих шахте.

Внезапные выбросы пород пока непредсказуемы, несмотря на многие годы усилий и исследований явлений, предвещающих выброс. Невозможным остается также предсказание землетрясений, хотя сейсмологи занимаются этим намного дольше с гораздо большим объемом средств, потраченных на исследования.

Многие выбросы случаются во время продуктивного (производственного) взрывания. Это особенно относится к взрывам, выполняемым централизованно в пространстве и сосредоточенно во времени. Так, в канадских шахтах обычно планируют большие продуктивные взрывы на последнюю смену в сутки перед выходным днем, что дает достаточное время для провоцирования внезапного выброса и стабилизации последствий сейсмической активности. Рассредоточение взрывов во времени не делает их спусковым механизмом потенциальных выбросов.

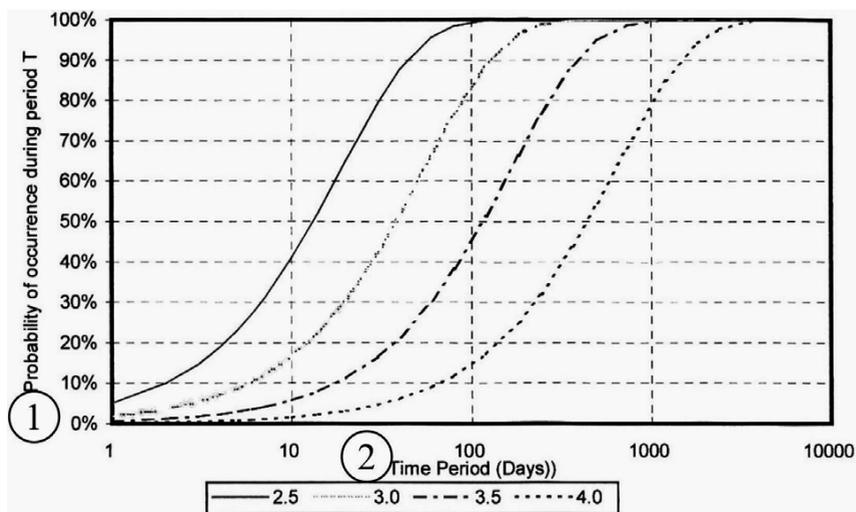


Рис. 1.5. Вероятность сейсмических событий для типичной большой шахты

1 – вероятность события; 2 – период времени (суток).

Чем сильнее выброс, тем более редко он происходит. Микросейсмические данные многих районов показывают, что незначительные сейсмические события имеют тенденцию сосредотачиваться во время взрывных работ или сразу после них, тогда как большие события происходят редко и неожиданно.

Следует при этом отметить принципиальное отличие объема пород, отторгнутых внезапным выбросом от объема их обычного обрушения (падения), вызванного силой тяжести и нарушениями природных связей между фрагментами. При одной и той же вероятности возникновения показатели обрушения существенно превышают объем пород, отторгнутых выбросом (рис. 1.6).

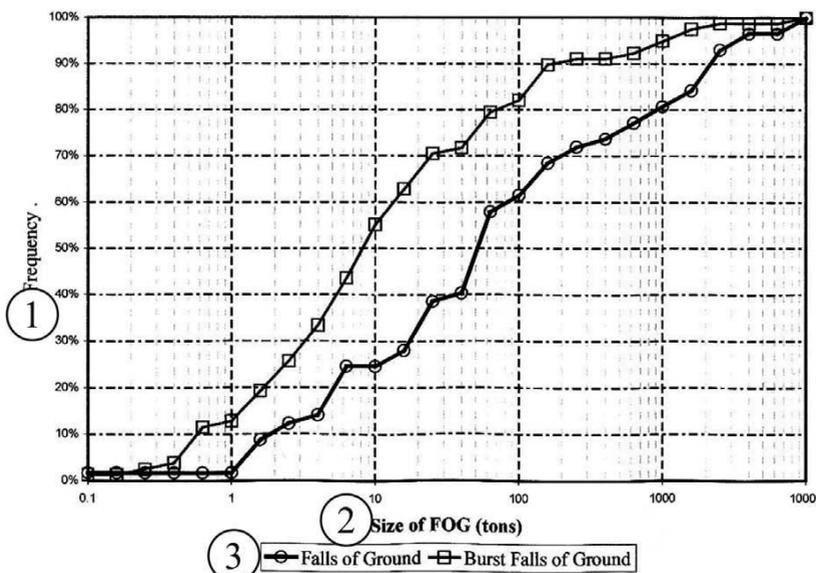


Рис. 1.6. Сравнение веса обрушенных или выброшенных пород
 1 – частота; 2 – вес пород; 3 – условные обозначения обрушенных
 и выброшенных пород.

1.2 Прочность и напряженность породных масс

Прочность породных масс определяется, как способность противостоять прикладываемой к ним силе и возникающему при этом напряжению. Предельной прочностью считается значение, при котором рассматриваемый структурный элемент (уступ шахты, кровля туннеля, оставленный целик) не может принять более высокой нагрузки. Прочность структур-

ного элемента определяется пиковым напряжением, разрушающим этот элемент.

Для горных пород, однако, это определение не означает, что при пиковом напряжении их несущая способность полностью исчерпана, поскольку в породах может существовать малая постпиковая (остаточная) прочность. Особенностью породного массива, кроме того, является невозможность оценки его прочности стандартными лабораторными исследованиями, поскольку им препятствует различие реальных подземных условий, в которых находится горный массив, и специальной изолированной лабораторной обстановки. Более того, взаимодействие между нетронутыми породами и геологическими неоднородностями (нарушениями, ослабленными зонами, изверженными вторжениями, плоскостями напластований) усложняет реальное поведение материала по сравнению с его индивидуальным лабораторным образцом, затрудняя интегрированное прогнозирование прочности породных масс. Их прочность «в массиве» из-за наличия неоднородностей иная, чем нетронутых пород. Дальнейшее уменьшение прочности определяется технологией ведения горных пород.

При экскавации полости в напряженном породном массиве природные напряжения σ_v , σ_{h1} и σ_{h2} (рис. 1.7) в ее окрестности перераспределяются. В результате горных работ индуцируются также новые напряжения и на типичный элемент пород действует три главных напряжения σ_1 , σ_2 и σ_3 . По общему согласию в горном инженерном деле, сжимающие напряжения всегда считаются положительными, из трех главных напряжений σ_1 – наибольшее сжимающее напряжение, а σ_3 – наименьшее сжимающее или наибольшее растягивающее напряжение.

Три главных напряжения взаимно перпендикулярны, но они могут отклоняться в направлении приложенных к массиву усилий. Рис. 1.8 показывает направления напряжений в породах, окружающих горизонтальный туннель, подверженный горизонтальным напряжениям в массиве σ_{h1} втрое большим,

чем вертикальные напряжения в массиве σ_v . Удлиненные отрезки рисунка представляют направления максимальных главных напряжений σ_1 , тогда как короткие отрезки – направления минимальных главных напряжений σ_3 в каждом рассматриваемом элементе. В данном конкретном случае σ_2 совпадает по оси с напряжением в массиве σ_{h2} , но другие главные напряжения σ_1 и σ_3 отклоняются от σ_v и σ_{h1} , в непосредственной окрестности туннеля.

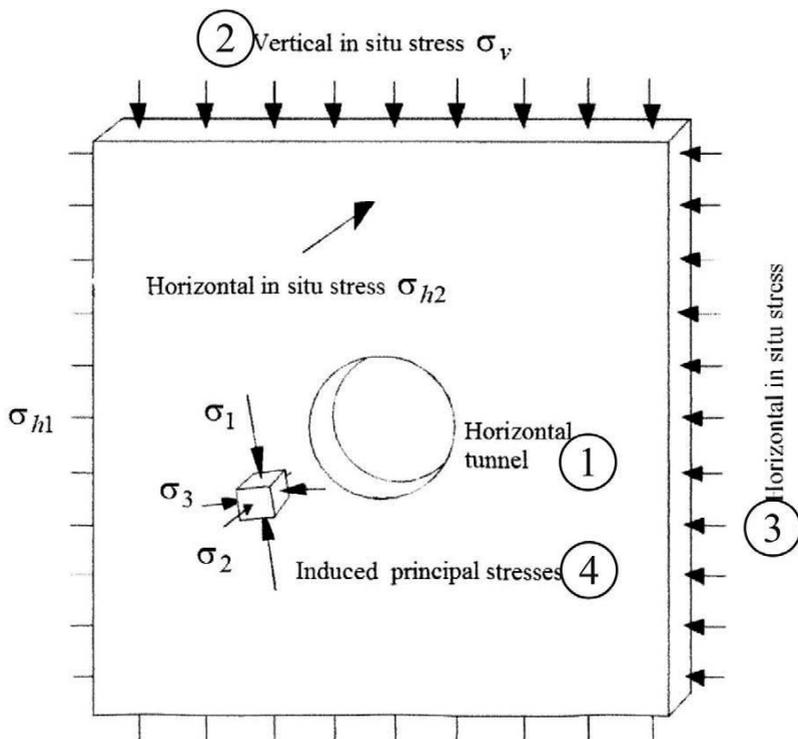


Рис. 1.7. Главные природные и индуцированные напряжения в горизонтальном туннеле

1 – горизонтальный туннель; 2 – вертикальные напряжения в массиве; 3 – горизонтально напряжения в массиве; 4 – главные индуцированные напряжения.

Контуры отношений к вертикальным напряжениям σ_v магнитуд максимального главного напряжения σ_1 и минимального главного напряжения σ_3 даются на рис. 1.9, который показывает, что перераспределение напряжений концентрируется в породах возле туннеля и что на расстоянии, например, трех радиусов от центра полости изменения поля напряжений в массиве пренебрежимо малы.

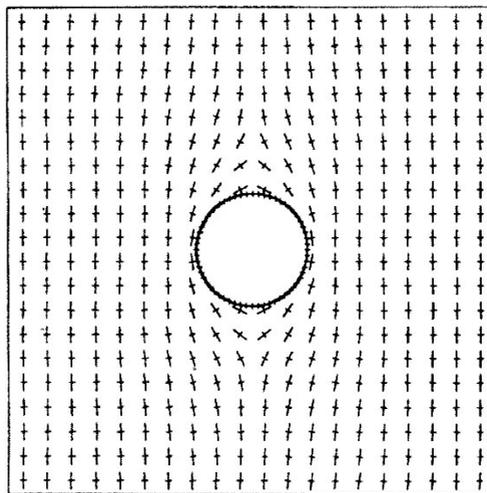


Рис. 1.8. Направления главных напряжений в породах, окружающих горизонтальный туннель

Как уже говорилось, в структурной механике термин «разрушение» определяется, как пункт, в котором нагрузка, действующая на строительный элемент, превышает его прочность. В механике горных пород, однако, термин «разрушение» часто используется менее строгим образом и может применяться для описания процесса пластической (необратимой) деформации материала до появления видимых трещин в стене или кровле полости, падения пород или даже полного обрушения подземной экскавации (рис. 1.10).

Процесс разрушения хрупких пород определяется следующими стадиями:

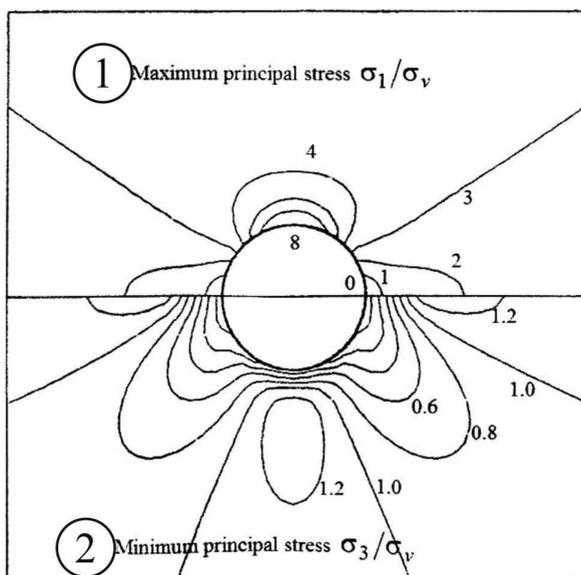


Рис. 1.9. Контуры магнитуд главных напряжений в горизонтальном туннеле

1 – главные максимальные напряжения; 2 – главные минимальные напряжения.

- закрытие существующих трещин;
- линейная упругая деформация после закрытия большинства существующих трещин;
- создание и развитие трещин, инициированных новыми напряжениями;
- высвобождение энергии и нестабильный рост трещин;
- разрушение материала и постпиковое поведение.

На рис. 1.11 показана одна из начальных стадий разрушения – отделение породных плит от внутренней поверхности туннеля. Другой вид разрушения – срез, возникающий после образования трещин расслоения (см. рис. 1.12), вызванных сжимающими напряжениями. Потенциальное расположение таких разрушений обнаруживается в зонах с наивысшими тангенциальными напряжениями вокруг полости (рис. 1.13). Стадии разрушения, показанные на рисунке, включают

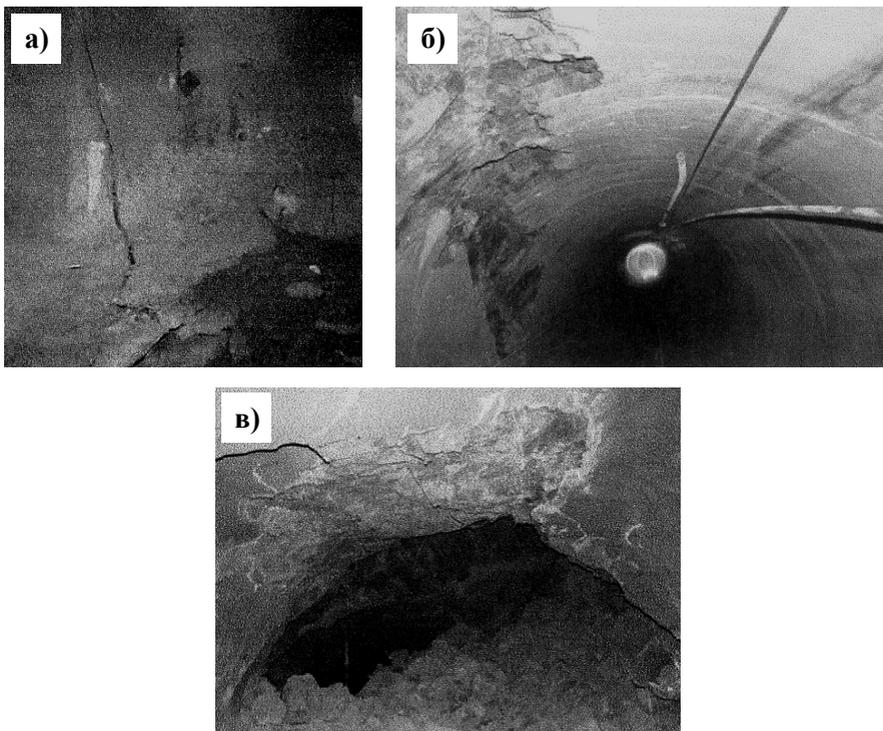


Рис. 1.10. Различные виды разрушений пород

а) видимые трещины в крепи туннеля (шахта Kristeneberg); б) обрушения пород в рудопуске (диаметр 4 м), вызванное сжатием (шахта Garpenberg); в) обрушение штрека (ширина 7 м, высота 6 м) (шахта Kiirunavaara).

появление трещин, их распространение и взаимодействие. Сосредоточение и рост трещин, их соединение при дальнейшем влиянии напряжений приводит к распространению зоны трещиноватости в породном массиве (рис. 1.14). В результате этого происходит формирование породных плит, параллельных поверхности полости. Обрушение может случиться, когда трещины соединяются с границами экскавации. Часто падение плиты начинается с ее концов из-за распространения среза, или с середины – из-за растяжений прогиба. Поэтому при расследовании аварий часто бывает трудно решить, что

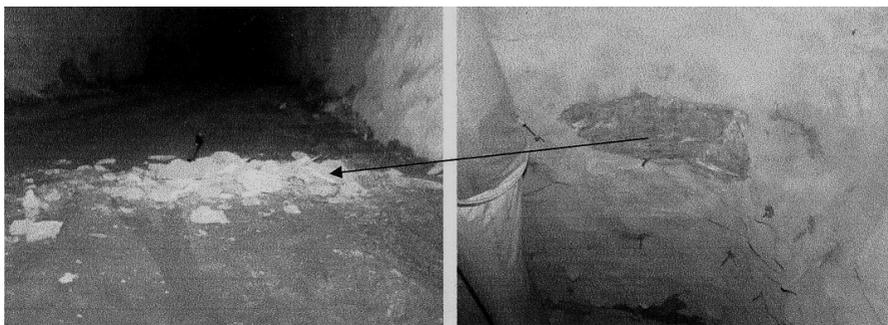


Рис. 1.11. Тонкие породные плиты, отделившиеся от массива (шахта Malmberget)

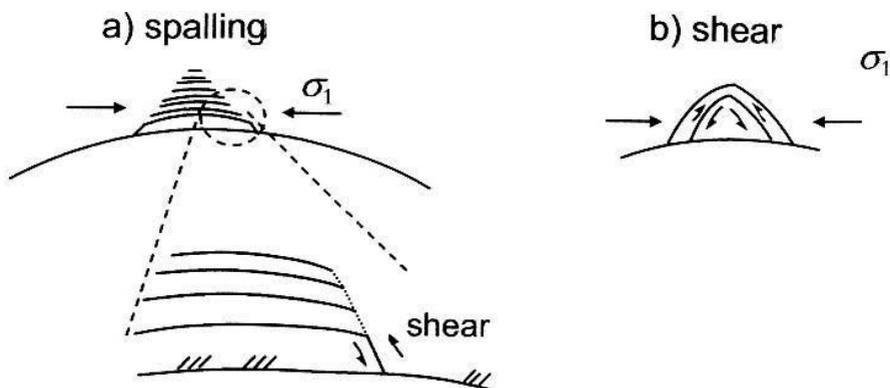


Рис. 1.12. Напряжения сжатия, вызывающие обрушение
а) расслоение; б) разрывное обрушение в экскавации твердых породных масс.

конкретно было причиной обрушения. Расслаиваясь, плиты иногда остаются частично присоединены к свободной поверхности породных масс (рис. 1.15).

После падения пород и благодаря ему, условия полости становятся более или менее стабильными, если не происходит нового изменения напряжений. В шахтах, где напряжения варьируются и изменяют направление из-за развития работ, падение пород может распространяться (рис. 1.16).

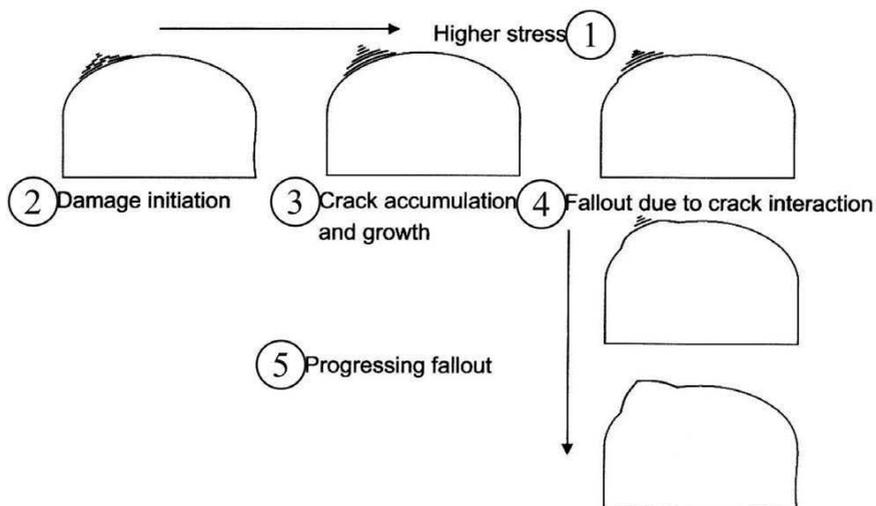


Рис. 1.13. Схема разных стадий процесса обрушения пород
 1 – более высокие напряжения; 2 – начало повреждений; 3 – увеличение трещиноватости; 4 – обрушение из-за взаимодействия трещин; 5 – прогрессирующее обрушение.

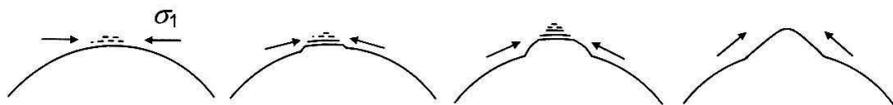


Рис. 1.14. Стадии процесса обрушения пород при передаче концентрации напряжений в породный массив (напряжение σ_2 направлено вдоль оси туннеля)

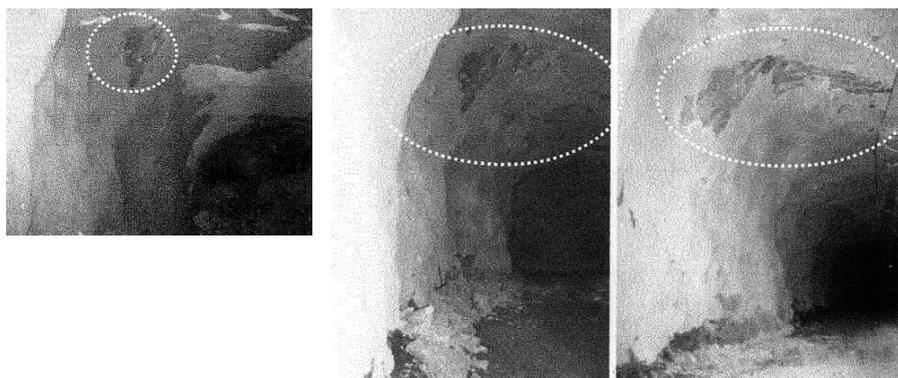
Примером обрушения расслоенных пород служит строительство туннеля доступа шириной 4,8 м и высотой 5,5 м шахты Kristineberg, Швеция. Расслоение и дальнейшее падение пород происходило в форме тонких плит крепкого кварцита, ориентированных параллельно поверхности туннеля на глубине примерно 1200 м. Технологические условия потребовали ориентации туннеля перпендикулярно максимальному главному горизонтальному напряжению. Для того, чтобы стабилизировать кровлю, потребовалось ее очистить от отсло-

ившихся плит перед установкой крепи, что привело к созданию полости глубиной около 1 м (рис. 1.17).



Рис. 1.15. Тонкие породные плиты (шахта Laisvalle)

а) частично отделенные от массива; б) полностью отделенные от массива.



а) September 25, 2007

б) October 10, 2007

в) May 26, 2008

Рис. 1.16. Распространение начального обрушения пород в штреке шахты Kiirunavaara

Далее описываются примеры обрушения хрупких пород при строительстве подземных полостей в скандинавских странах.

В Юго-Западной Швеции в поздних 1970-х гг. проводилась экскавация подземного хранилища сырой нефти, состоящего из трех параллельно сдвоенных туннелей (рис.1.18).

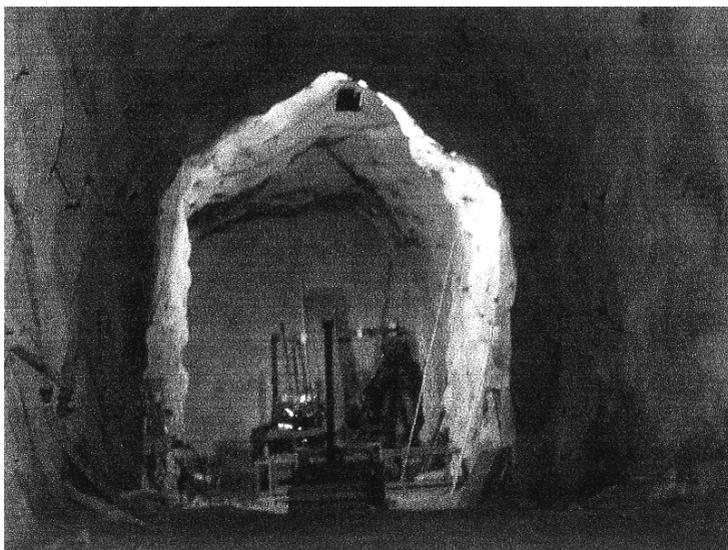


Рис. 1.17. Очищенная от слоев пород полость шахты Kristineberg

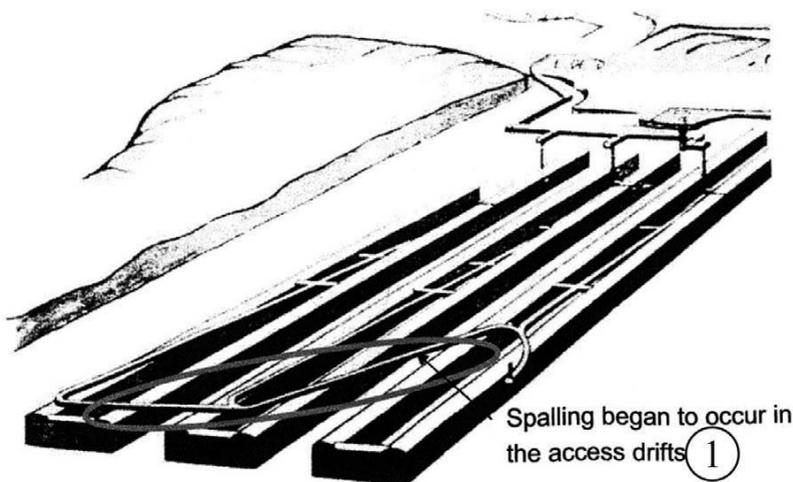


Рис. 1.18. Хранилище сырой нефти с туннелями доступа в Швеции

1 – расслоение началось в туннелях доступа.

Обычная буровзрывная экскавация выполнялась в очень хорошем гомогенном граните с малыми включениями пегмати-

та. После нескольких сот метров проходческих работ на глубине 45-55 м от поверхности началось расслоение пород в туннелях доступа, очерченных серым контуром на рисунке. Здесь формировались горизонтальные плиты толщиной 2-15 см. В некоторых случаях отмечался шум трещинообразования, сопровождающий расслоение пород. Кроме того, в однородных породах местами наблюдалось образование вогнутых поверхностей срезающих разрушений. В районе, где началось расслоение, туннель доступа имел ширину 10,2 м и высоту 6,5 м.

В шахте Garpenberg, Швеция добывается руда цинка, селитра, свинец, медь, золото. Незакрепленный рудоспуск диаметром 2,13 м расположен на участке глубиной между 830 и 880 м. Горные работы проводились на расстоянии 175 м от рудоспуска, который размещался, главным образом, в известняке с прочностью на сжатие 73-78 МПа, частично – в доломите и брекчиях. Расслоение поверхности рудоспуска началось непосредственно после сооружения рудоспуска в направлении, перпендикулярном к максимальному напряжению. Глубина выпадения пород составила 0,05 м (рис. 1.19).

Туннель Heggviga, Норвегия длиной 5360 м и размерами сечения 8-8,5 м (ширина) на 5-5,5 м (высота) располагался на глубине 670 м. Падения породы из-за ее расслоения наблюдались в верхнем углу и, частично, в нижнем углу сечения. Наибольшие проблемы встретились в районе гнейсов, где обрушения происходили сразу после взрывных работ.

Туннель Kobbskaret, Норвегия длиной 4457 м и сечением 50 м² проходил с помощью буровзрывных работ. Район характеризуется интенсивной складчатостью, расслоением и прогибом плит, показывая высокие горизонтальные напряжения. Вдоль длины туннеля породная масса состояла из зернистого гнейсового гранита. Толща пород, покрывающих туннель, составляла около 630 м. Расслоение происходило в кровле туннеля, как во время экскавации, так и после завершения строительства в течение 10 лет. Глубина воронок об-

рушения колебалась от 0,05 м до 0,3 м. После установки крепи обрушения прекратились.

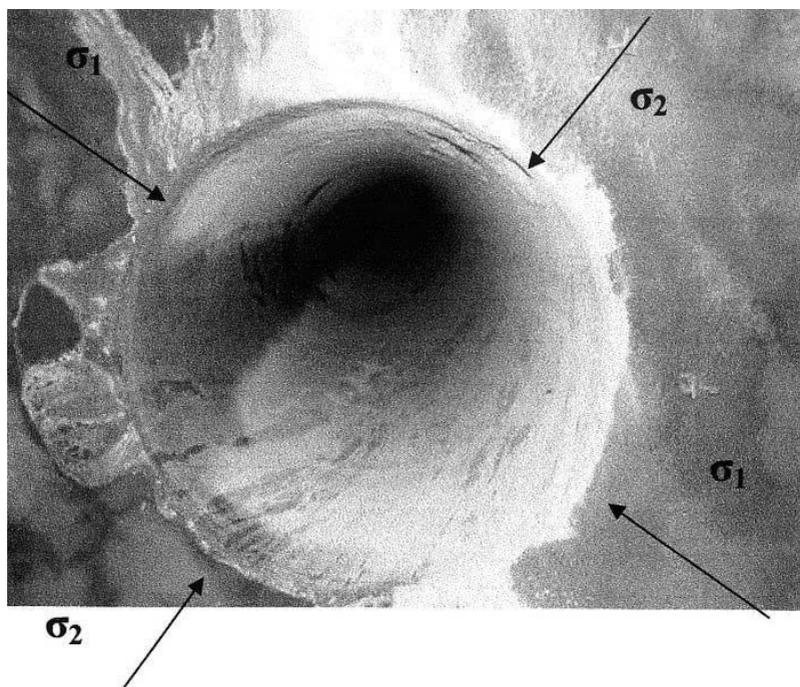


Рис. 1.19. Напряжения и расслоение пород в рудоспуске гор. 880м шахты Garpenberg

В шахте Renstrom, Швеция (цинк, медь, свинец, золото, серебро) в рудоспуске диаметром 3,7м, расположенном на глубине между 1115 и 1185м падения пород, вызванные сжимающими напряжениями, наблюдались в направлении, перпендикулярном максимальному главному напряжению. Породные массы выпадали, образуя воронку, глубиной 0,1-0,2м. Такие обрушения происходили либо сразу после экскавации, либо через одну неделю после нее (рис. 1.20).

Штрек шахты Zinkgruvan, Швеция (цинк, свинец, серебро) проходил сечением 4,7х4,5 м на глубине 965 м для разведки новой части рудного тела (рис. 1.21) по хрупкому кварцевому полевому шпату. Обрушения в штреке не наблюда-

лись, пока он был параллелен главному горизонтальному напряжению, но возникли, когда направление штрека изменилось.

Обзор описанных случаев приведен на рис. 1.22.

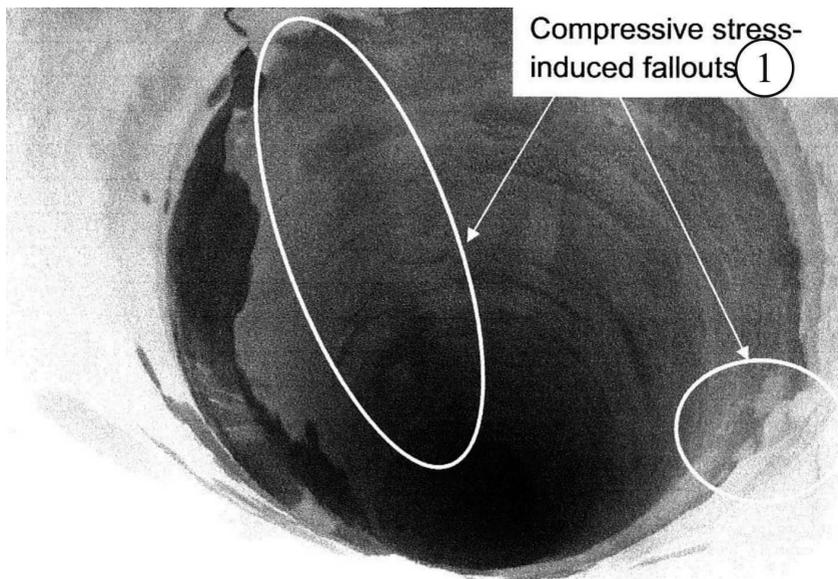


Рис. 1.20. Обрушение пород в рудоспуске после нанесения набрызгбетона

1 – места обрушенной породы.

1.3 Поведение пород в поле напряжений

Знания о состоянии напряжений в породном массиве – важная проблема геологии и геофизики, имеющая значение, как для горнодобывающей индустрии, так и для гражданского строительства, которое усложняется с ростом глубины подземных работ. Однако, экскавация на малых глубинах также может вызвать трудности из-за высоких горизонтальных напряжений.

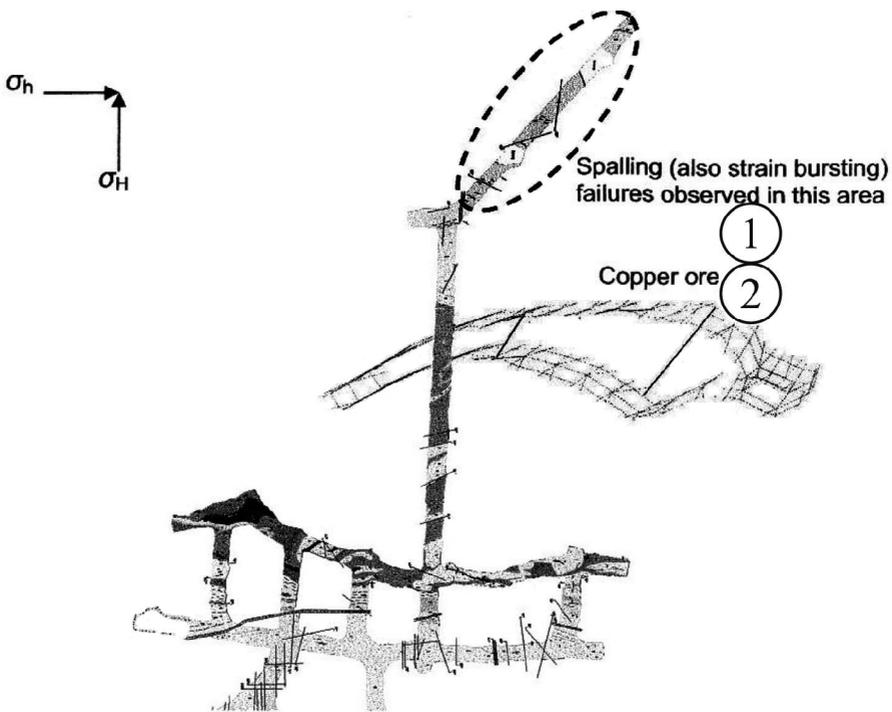


Рис. 1.21. План расположения разведочного штрека (гор. 965м шахты Zinkgruvan)

*1 – зона расслоения пород (и напряженных выбросов);
2 – медная руда.*

Выше отмечалось, что напряжения в породном массиве могут быть вызваны разными причинами. Один из возможных вариантов терминологии напряжений, предложенной некоторыми авторами, показан на рис. 1.23.

Если предполагается, что породы упруги и находятся под осевой нагрузкой, перераспределение напряжений формирует вокруг полости «обтекание» траекторий наибольших главных напряжений (рис. 1.24). Короткое расстояние между линиями потока показывает увеличение напряжений, широкое расстояние – их уменьшение по сравнению с природным состоянием. На расстоянии около трех диаметров от границы полос-

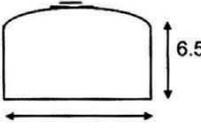
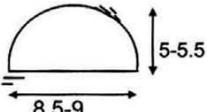
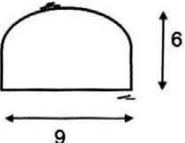
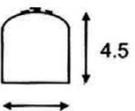
Cross section [m] and fallout location (1)	Fallout depth [m] (2)	Rock type (3)	σ_{ci} [MPa] (4)	Depth* [m] (5)	σ_H [MPa]	σ_h [MPa]	σ_v [MPa]
Brofjorden access tunnel 	0.02-0.15	Granite (6)	200	50	20 (**)	8	2
Garpenberg raise 	0.05	Limestone (7)	73-105	830-880	45	20	24
Heggura road tunnel 	0.05-0.4	Garnet-gneiss (8) Granulites (9)	154 210	670	24.5 (**)	8.5	7.5
Kobbskaret road tunnel 	0.05-0.3	Gneissic-granite (10)	109.5	630	24 (**)	17	12
Renström raise 	0.1-0.2	Andesite (11)	120-200	1115-1185	48	14	24
Zinkgruvan exploration drift 	0.1-0.2	Leptite (12)	160-300	965	55 (**)	54	28

Рис. 1.22. Обзор случаев разрушения пород в выработках шахт Швеции

Объяснения к рис. 1.22:

1 – размер сечения выработок и места обрушения; 2 – глубина полости обрушения; 3 – вид пород; 4 – напряжения; 5 – глубина выработки; 6 – гранит; 7 – известняк; 8 – гнейс; 9 – гранулит; 10 – гнейс-гранит; 11 – андезит; 12 – лептит.

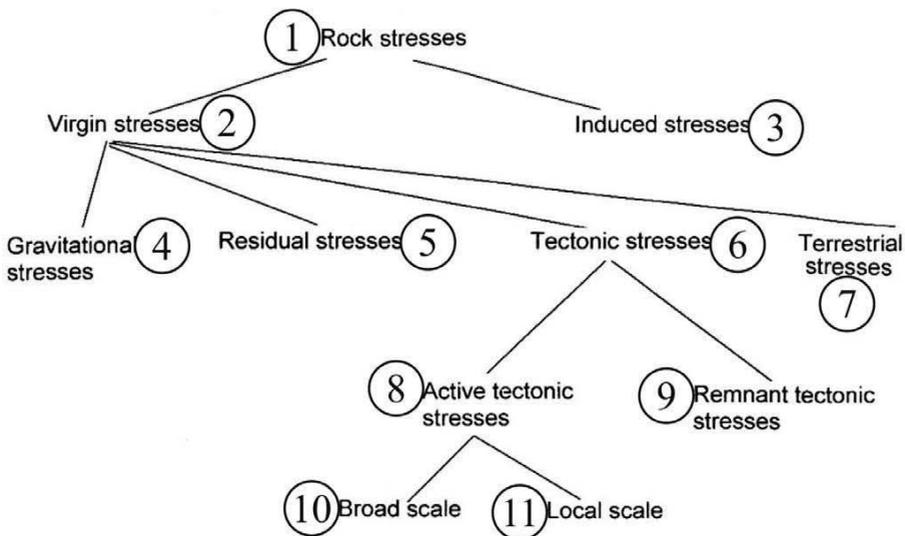


Рис. 1.23. Терминология напряжений

1 – напряжения пород; 2 – природные напряжения; 3 – индуцированные напряжения; 4 – гравитационные напряжения; 5 – остаточные напряжения; 6 – тектонические напряжения; 7 – континентальные напряжения; 8 – активные тектонические напряжения; 9 – реликтовые тектонические напряжения; 10 – общий уровень; 11 – местный уровень.

ти природные напряжения можно считать незатронутыми, откуда следует, что одиночная экскавация влияет на напряжение очень локально.

Когда поперечное сечение полости изменяется от круглого к какой либо иной форме, существенно увеличиваются трудности в аналитическом определении состояния напряжений. Круглая форма дает более гладкий поток напряжений вокруг экскавации по сравнению, например, с квадратной или

прямоугольной. Углы сечения полости становятся пунктами концентрации напряжений, а над серединой кровли формируются зоны уменьшенных напряжений, тогда как в стенах они увеличиваются (рис. 1.25).

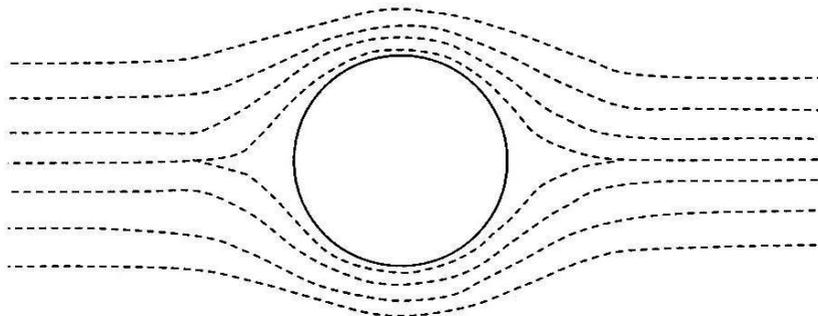


Рис. 1.24. Траектории «обтекания» главных напряжений вокруг туннеля круглого сечения

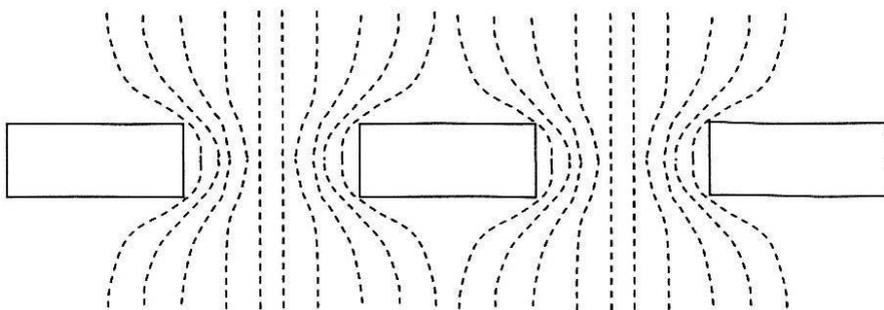


Рис. 1.25. Линии напряжений вокруг параллельных туннелей прямоугольного сечения

Когда к существующей полости прибавляется дополнительная экскавация, поле напряжений распространяется на большую площадь. Перераспределение напряжений вокруг полости может влиять на их величину возле других полостей, усложняя расчеты вторичных напряжений. Простейшим примером такой ситуации служат два параллельных круглых туннеля, поле напряжений вокруг которых еще не представ-

ляет больших проблем для аналитического подхода к его исследованию. Когда поперечное сечение становится более сложным (не круглым) или число экскаваций превышает две, должны использоваться компьютерные методы геотехнической механики для определения взаимного влияния полостей друг на друга и совместного действия создаваемых напряжений.

Подземное строительство или горнодобывающие предприятия во время своего жизненного цикла создают полости, простирающиеся на большие расстояния и, следовательно, образуют расширенные поля напряжений. Сложная геометрия горных работ и их взаимозависимая последовательность усложняют определение вторичных напряжений вокруг полостей и в массиве окружающих пород. Возникают индуцированные напряжения, вызванные подземными работами, в частности, образованием выработанного пространства после извлечения полезного ископаемого, изменением жесткости или податливости оставленных целиков и добычных уступов, реакцией на закладку и т.д. На поле напряжений разными путями влияют такие системы разработки и последовательность извлечения полезного ископаемого, выбор которых определяется геологическими и технологическими факторами.

Схема поля напряжений для крутопадающей залежи руды (более 60°) показана на рис. 1.26. Чем глубже шахта, тем выше становится концентрация напряжений в зоне работ. Рис.1.27 иллюстрирует перераспределение и рост напряжений в уступах таких месторождений. Обычно здесь предусматривается погоризонтная отработка залежи с высотой горизонта 40-60 м. Выемка руды ведется 8-10 слоями с закладкой выработанного пространства. После окончания отработки уступа его остающиеся запасы формируют целик, подверженный очень высоким напряжениям. Если последние превышают прочность пород, происходит обрушение либо целика, либо стен рабочего пространства.

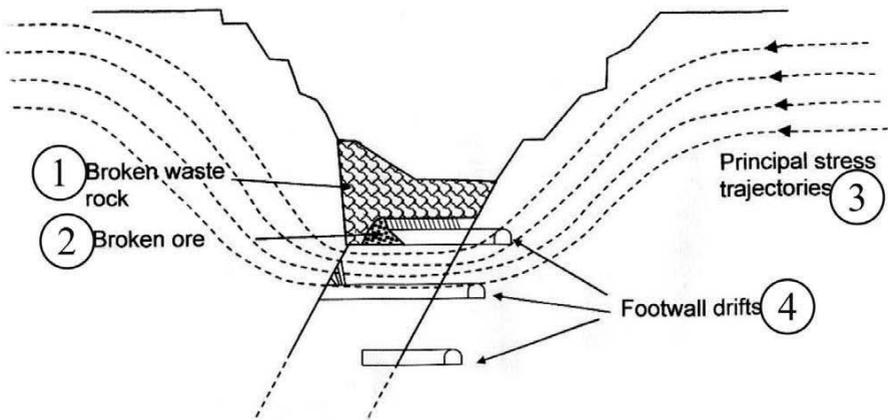


Рис. 1.26. Схема перераспределения напряжений вокруг зоны экскавации полости

1 – породные отходы; 2 – раздробленная руда; 3 – траектории главных напряжений; 4 – штреки в лежащем боку массива.

При горизонтальном или пологом залегании рудного тела напряжения, параллельные месторождению, также частично перераспределяются над и под выработанным пространством (рис. 1.28).

Влияние развития добычных работ на поле напряжений в выработке туннельного типа, пройденной в лежащем боку вмещающих пород залежи, показано на рис. 1.29.

Временные полости, например, рудоспуски или вентиляционные выработки также подвергаются воздействию перераспределения напряжений вокруг них. Все эти экскавации выполняются заблаговременно, располагаются на некотором расстоянии от рудного тела и проходят годы прежде, чем добычные работы достигают их горизонта. Стволы, например, испытывают различные напряжения вдоль их глубины: на нижнюю часть, где пока отсутствует влияние добычных работ, воздействует природное поле напряжений, средняя часть ствола может быть весьма напряжена из-за близкой экскавации в то время, как верхняя часть, где закончилась добыча, уже разгружена и имеет состояние значительно меньших на-

A)

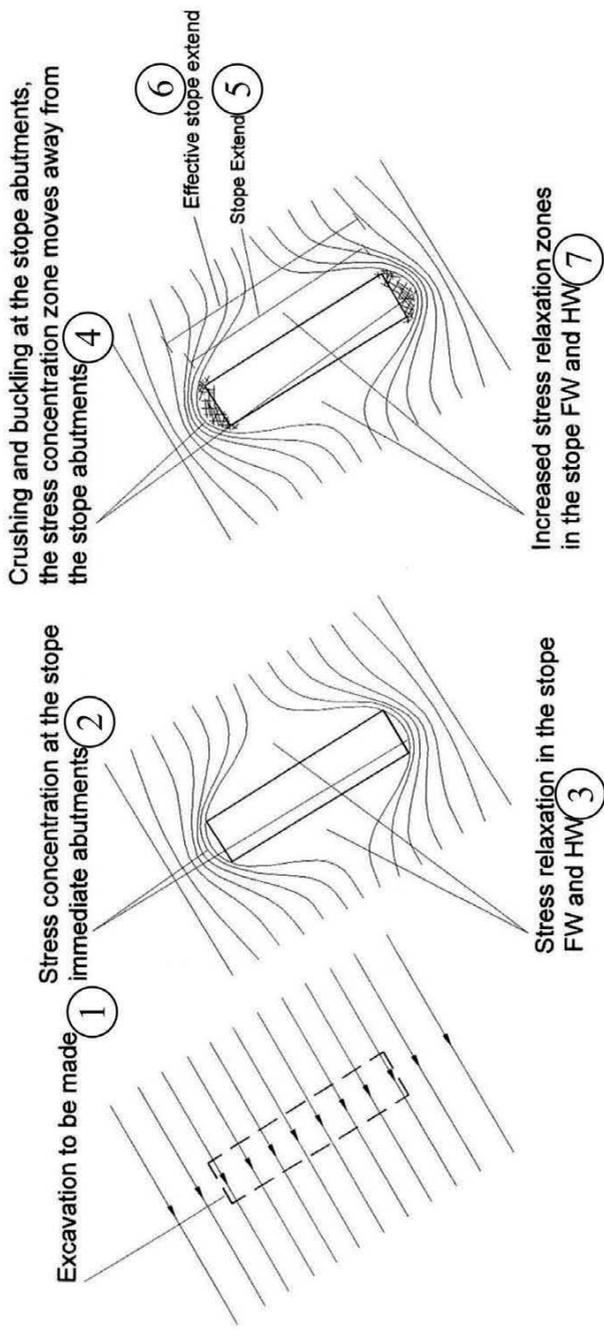


Рис. 1.27 Перераспределение и рост напряжений в добычных уступах при развитии горных работ

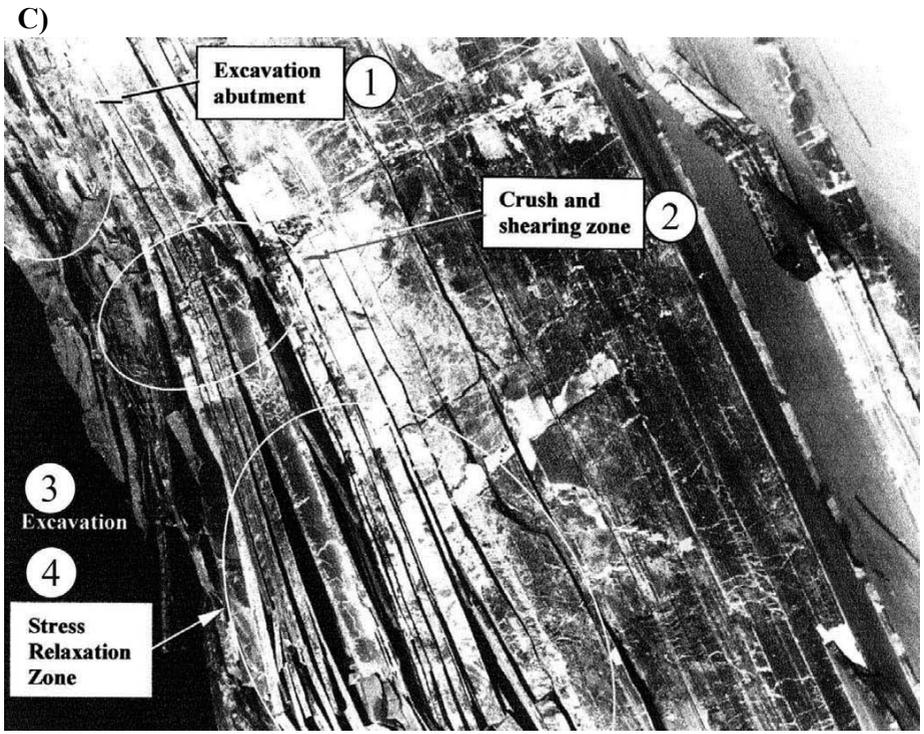
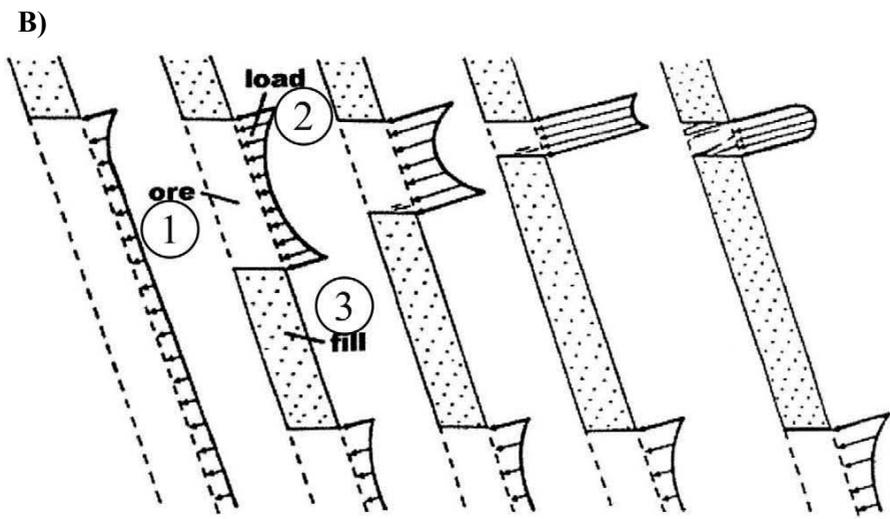


Рис. 1.27 Перераспределение и рост напряжений в добычных уступах при развитии горных работ (окончание)

Объяснения к рис. 1.27:

A. Схема перераспределений напряжений.

a) перед экскавацией;

в) непосредственно после экскавации;

с) перераспределение напряжений, зависящее от времени.

1 – будущая экскавация; 2 – концентрация напряжений в опорах уступа; 3 – зона разгрузки в уступе (в висячем и лежащем боках); 4 – разрушение и прогиб в опорах уступа, зона концентрации напряжений отдаляется от опор уступа; 5 – расширение уступа; 6 – окончательное расширение уступа; 7 – увеличенная зона разгрузки в уступе (в висячем и лежащем боках).

B. Схема роста напряжений в уступах.

1 – руда; 2 – нагрузка; 3 – закладка.

C. Увеличение деформаций при росте напряжений в уступе.

1 – опора экскавации; 2 – зона разрушений и среза; 3 – экскавация;

4 – зона разгрузки напряжений.

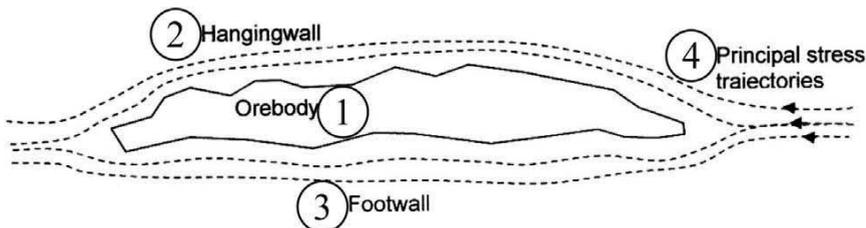


Рис. 1.28. Перераспределение напряжений при горизонтальном или пологом залегании рудного тела

1 – руда; 2 – висячий бок; 3 – лежащий бок; 4 – траектории главных напряжений.

пряжений. Поля напряжений изменяются с течением времени по магнитуде и ориентации.

Когда забой полости удаляется, остающиеся позади него породные массы (и установленная крепь) деформируются, создавая трещиноватость и генерируя сейсмические волны. На все эти явления требуется энергия, запасы которой аккумулируются в породах при создании подземной полости во время добычных работ или строительства.

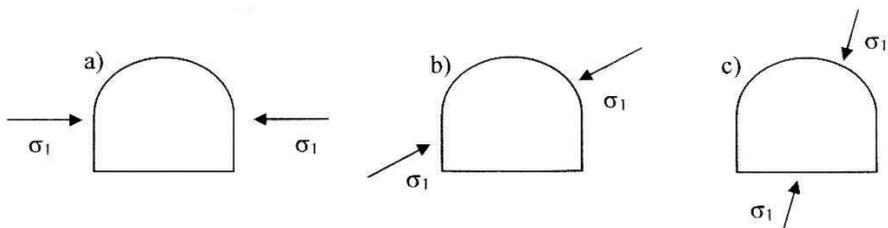


Рис. 1.29. Поворот поля напряжений вокруг полевого штрека в лежащем боку массива

а) период проведения штрека; б) добычные работы поравнялись с данным пунктом штрека; в) добычные работы прошли далее данного пункта штрека на 100 м и более.

При расширении экскавации окружающие породные массы двигаются в сторону создаваемой полости, вызывая изменения в них потенциальной энергии W_t . Извлекаемые породы также содержат хранящуюся в них энергию U_m и сумма этих значений представляет собой энергию, которая формируется, как результат расширения экскавации и должна быть рассеяна.

Напряжения, действовавшие на извлеченные породы, передаются окружающему массиву, который увеличивает сохраняемую в нем энергию напряжений U_c . Если полость поддерживается крепью, некоторая энергия W_s поглощается ее деформацией. Остающаяся энергия может считаться потенциально высвобождаемой W_r . Закон сохранения энергии в этом случае дает уравнение:

$$W_t + U_m = U_c + W_s + W_r$$

Кинетическая энергия колебаний породных масс при мгновенном отрыве их части во время экскавации или сейсмическая энергия W_k при затухании колебаний рассеивается. Тогда высвобождаемая энергия равняется сумме энергии, хранящейся в извлеченных экскавацией породах U_m , и кинетической энергии W_k .

$$W_r = U_m + W_k$$

Компонент сейсмической энергии вызывает повреждения в контуре полости или внезапный выброс пород.

Из приведенных уравнений следует, что:

$$W_k = W_t - (U_c + W_s)$$

Потенциал внезапных выбросов описывается отношением W_k/W_r . Чем оно больше, тем выше потенциал выброса. Отсюда исследователями делаются следующие выводы:

- если горные работы выполняются малыми (элементарными) шагами, процесс является стабильным и сейсмическая энергия не высвобождается;
- изменения потенциальной энергии являются определяющими: если она может быть уменьшена, другие компоненты энергии уменьшаются соответственно;
- поддержание выработанного пространства (закладка) целесообразна по двум причинам: оно уменьшает изменение потенциальной энергии снижением конвергенции боков рудного тела и поглощает энергию, высвобождаемую в качестве сейсмической.

Иллюстрация баланса энергии показан на рис. 1.30.

При решении задач, связанных с поведением пород в условиях напряжений массива, важную роль играет прогнозирование воздействия на причины обрушений особенностей пород и их неоднородностей. По результатам исследований породных образцов построена кривая «напряжения/деформации», характеризующая поведение пород при росте нагрузки на них (рис. 1.31). Эта кривая может быть разделена на три нелинейных части I, III и IV и одну линейную часть – II.

Часть I показывает стадию неупругого поведения. Теория упругости утверждает, что, когда материал нагружен, а затем разгружен, деформации, испытываемые им из-за этой нагрузки, возвращаются к нулю. Поэтому, когда материал ведет себя упруго, изменения, возникающие в нем в ходе нагрузки, обратимы. На части I кривой рис. 1.31 (неупругая стадия) материал не вернется к исходному состоянию. В этой стадии

происходит закрытие таких неоднородностей, как поры, трещины и др., из-за чего увеличивается скорость волны напряжений.

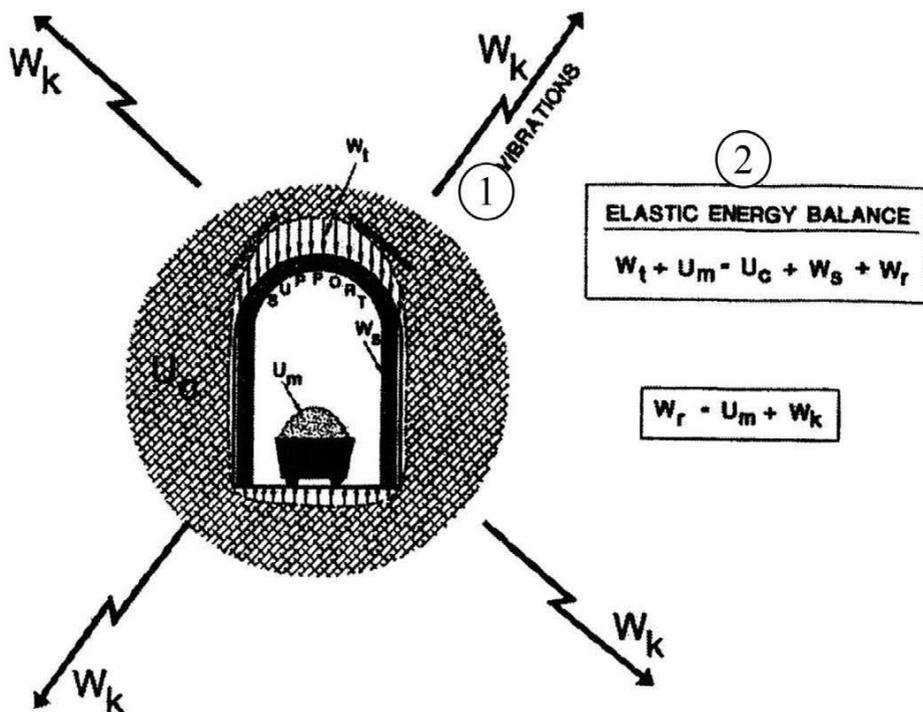


Рис. 1.30. Баланс упругой энергии
 1 – вибрации; 2 – баланс упругой энергии.

Часть II кривой рис. 1.31 будет достигнута, когда неоднородности образца будут полностью закрыты. Однако, согласно исследованиям, для этого требуется давление, иногда превышающее 500 МПа у некоторых видов пород. Эта часть II строго линейна, поскольку демонстрирует упругое поведение образца. Верхний отрезок части II означает начало формирования и распространения микротрещин, которые приводят к стадии III кривой напряжений.

Stress-Strain Curve

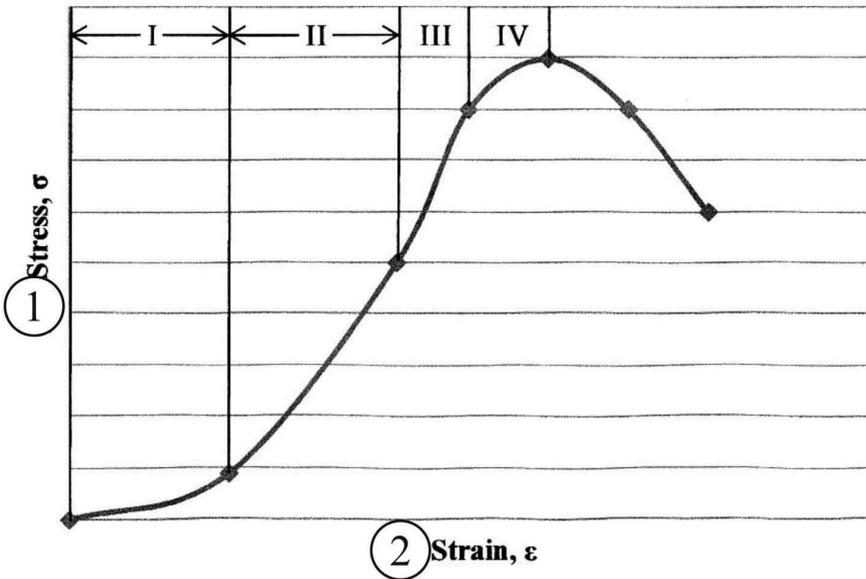


Рис. 1.31. Кривая «напряжения - деформации» для образца пород при осевом сжатии
1 – напряжения; 2 – деформации.

При $2/3$ максимальной прочности породы начинается стадия нелинейной части III кривой, когда происходят необратимые повреждения пород. Начавшееся образование новых микротрещин на этой стадии увеличивается, каждое увеличение нагрузки приводит к их расширению. Происходит уменьшение скорости волны напряжений из-за фрагментации внутренней структуры пород.

Затем формирование и распространение микротрещин продолжается и приходит к части IV кривой, когда системы трещин объединяются, создавая плоскость при пиковом напряжении.

1.4 Управление поведением пород в условиях высоких напряжений

Первым шагом управления поведением породных масс является его прогнозирование различными методами в сочетании с выбором решений по геометрии подземных работ и их последовательности. В теоретическом и практическом подходах к управлению поведением пород применяются аналитические, эмпирические, цифровые (компьютерные) и наблюдательные методы.

Аналитические (теоретические) методы посвящены оценке соотношений прочности пород и напряжений, действующих на них. Существуют различные пути разработки этих методов, рассматриваемые в курсах механики горных пород и выходящие за рамки данной книги.

Эмпирические методы базируются на показателях прочности пород на осевое сжатие, максимума и минимума напряжений в массиве, индекса сосредоточенной нагрузки и тангенциальных сжимающих напряжений вокруг экскавации.

Цифровые методы в сочетании с компьютерной технологией в настоящее время используются при планировании экскавации или управления устойчивостью подземных структур, и могут быть разделены на три группы: непрерывные, дискретные и комбинированные. Выбор конкретной модели базируется на многочисленных факторах таких, как вид пород, структурные неоднородности, особенности материала породных масс.

Непрерывные методы цифрового моделирования используют предположения, что исследуемая структура непрерывна и может быть условно разделена на внутренние связанные элементы. Преимущества использования этих методов проявляются, когда моделируемую реальную структуру на самом деле можно считать непрерывной, т.е. породный массив монолитен и в нем отсутствуют перемещения блоков и крупные трещины. Если моделируемая структура имеет большое число

неоднородностей, которые заставляют породные массы перемещаться не как единая система, эти методы не могут быть применены.

Дискретные методы предполагают, что имитируемая структура разграничена сочленениями и имеет среднее значение трещиноватости. Здесь методы моделирования основываются на дискретных элементах, а в структуре ожидаются большие перемещения блоков.

Комбинированный метод использует преимущества обоих описанных методов и устраняет некоторые недостатки, связанные с их практическим применением. Существует ряд программ плоскостных (в двух измерениях) и пространственных (объемных, в трех измерениях) таких, как FLAC, FLAC3D, 4DEC, 3DEC, которые не объясняют с исчерпывающей полнотой механизма поведения пород, однако, доказали, что служат хорошим инструментом принятия решений, относящихся к дизайну и планированию экскавации подземных полостей.

Общая характеристика цифровых методов приведена авторами в книге «Большие подземные полости: дизайн и строительство», «Норд-Пресс», Донецк, 2009.

Цифровые модели для целей дизайна подземной экскавации могут успешно имитировать почти все характеристики породных масс, однако, иногда они не соответствуют реальности конкретной подземной обстановки. Их недостатки снижаются методами наблюдательного подхода.

Наблюдательный подход к дизайну, использующий исходные данные, получаемые из геотехнической разведки и мониторинга поведения пород, служат фундаментальным элементом процессов дизайна и строительства. Дизайн считается незавершенным, пока его предложения не подтверждены реализацией структурных решений. В ходе процесса оценки дизайна прогнозируемое поведение массива сверяется с реальным.

Такой подход тем более необходим, что геологические неоднородности, варьированность материала, нелинейность процессов распространения деформаций и обрушений пород и т.д. не могут быть правильно представлены в начальном дизайне из-за ограничений базы данных, эффектов масштаба, прогноза взаимодействия планируемой структуры с окружающими породами.

Сегодня при достаточном времени и мощности компьютеров по мере определения необходимых исходных данных возможно моделировать и корректировать почти все природные и производственные процессы детерминистским или вероятностным способами. К примеру, за последние 30 лет сделано значительное продвижение в измерениях напряжений в массиве и интерпретации этих измерений по отношению к геологическим структурам. Главным ограничением такой интерпретации является недостаточность измерений на каждой строительной площадке. Исключениями здесь являются комплексы подземных научных лабораторий и складирования радиоактивных промышленных отходов. Так, для подземной лаборатории в Канаде (URL – Underground Research Laboratory) было сделано около 350 трехосевых измерений напряжений в объеме породного массива 100x100x500 м. Это более, чем вдвое превышает подобные измерения вместе взятые, проведенные ранее на Канадском геологическом щите.

Однако, даже если требуемые исходные данные представлены, необходимо преодолеть две основные проблемы:

- построенная модель может неадекватно отражать физический процесс, наблюдаемый реально;
- переход от сплошной среды к разрывной (например, нестабильное поведение обрушающейся хрупкой породы) может быть неправильно моделирован.

Модели, не соответствующие реальным физическим процессам, прогнозируемым или наблюдаемым, не могут использоваться для дизайна. Однако, если процесс слишком сложен для понимания, используются упрощенные модели,

идентифицирующие ситуации с реальными отклонениями от идеализированного поведения. Отсюда следует, что модели не могут эффективно использоваться изолированно – они должны постоянно оцениваться и пополняться результатами наблюдательного подхода.

В качестве практических подходов к управлению поведением горных пород служат следующие технологии:

- предотвращение или уменьшение напряжений, индуцированных горными работами, изменением расположения и направления строящейся подземной полости;
- уменьшение напряжений переходом их от растягивающих к сжимающим изменением формы полостей и их элементов, увеличением расстояния между соседними полостями;
- усиление пород искусственным созданием их дополнительной прочности;
- повышение сопротивления полости установкой крепи;
- перемещение источника напряжений изменением последовательности работ;
- разгрузка породного массива перераспределением напряжений.

Предотвращение или уменьшение напряжений достигается изменением расположения входов, направления трассы, места размещения подземной полости таким образом, чтобы избежать встречи нарушенных зон, изверженных вторжений, селевых потоков, старых горных работ, обширных зон оседания. Если нарушение должно быть пересечено, трасса полости направляется так, чтобы встретить его по возможности под прямым углом. Концентрация напряжений предотвращается скруглением углов прямоугольных полостей и их сочленений.

Уменьшение напряжений обеспечивается изменением растягивающих и изгибающих напряжений на сжимающие, когда кровля полости принимается арочной формы или сечение ствола изменяется с прямоугольного на круглое. В близко расположенных соседних полостях напряжения пород сни-

жаются оставлением опорного целика между полостями или созданием безопасного расстояния равного, например, трем диаметрам большей из полостей.

Усиление пород создается напорной инъекцией (тампоном) в породный массив твердых частиц, взвешенных в жидкой среде, или химикатов в виде растворов для упрочнения пород, стабилизации напластований, а также создания вокруг строящегося объекта водоупорного слоя. Напорный тампонаж выполняется бурением в породный массив скважин необходимого диаметра, длины и направления. Подробно об этом см. книгу авторов «Подземное строительство в нестабильных условиях», «Норд-Пресс», Донецк, 2008.

Повышение сопротивления подземной полости достигается системами крепи, которые могут состоять из комплексов анкерных и канатных болтов, тампонируемых гладких или арматурных стержней, металлических полос или рам, набрызгбетона и металлической сетки, монолитного бетона и т.д. В табл. 1.1 приведены основные параметры разных видов крепи.

Наиболее распространенным инструментом повышения сопротивления полости служит установка в специально пробуренных скважинах болтов, которые могут быть механическими или тампонируемыми. Функции повышения сопротивления полости они выполняют, усиливая (скрепляя) окружающий ее массив. Наиболее часто применяются болты типа арматурных стержней, тампонируемых цементом или полимерами. Иногда болты заменяются канатами, особенно при необходимости укрепления массива на большую глубину. В последние десятилетия разработаны конструкции анкерной крепи, приспособленные к работе в условиях высоких напряжений, в сейсмически опасных и выбросоопасных зонах. Здесь крепь должна абсорбировать энергию напряжений и обладать податливостью, способной воспринять появляющиеся деформации горных пород (см. об этом главу 3). Болты любого вида работают наиболее эффективно, если они уста-

Таблица 1.1 – Сравнение параметров разных видов крепи

Параметры	Обыч- ный на- брызг- бетон	Армиро- ванный набрызг- бетон	Набрызг- бетон с полимер- ными до- бавками	Анкер- ные бол- ты и стержни	Обыч- ный бетон	Ар- миро- ван- ный бетон
Номинальная толщина, мм	50	75	2	-	300	300
Диаметр экс- кавации, м	6	6	6	6	6	6
Максималь- ное теорети- ческое со- противление, кРа	100	125	100	70	2000	2200
Деформация разрушения, мм	5	8	100	250	0,5	1
Прочность на сжатие, МПа	30	30	нет дан- ных	-	25	25
Прочность на растяжение, МПа	3	10	5-10	275	3	8
Потери при отскоке, %	5-25	5-30	1	-	-	-
Сейсмич- ность (защи- та от выбро- сов)	низкая	удовле- творительная	низкая	низкая	удов- летво- ри- тельная	удовл- етво- ри- тельная
Сопротивле- ние коррозии	хоро- шее	удовле- творительное	хорошее	удовле- творительное	хоро- шее	хо- рошее
Общая стои- мость	низкая	средняя	низкая	низкая	высо- кая	высо- кая

навливаются сразу после обнажения пород.

Перемещение источника напряжений обеспечивается изменением последовательности экскавации подземной полости или отработки уступов, что позволяет переместить напряжения, индуцированные экскавацией от забоя в глубину массива, облегчая тем самым ведение горных работ.

Разгрузка породного массива решает тот же вопрос перемещением напряжений от забоя (или контуров полости) более эффективно с помощью так называемого разгрузочного взрывания. Адекватно выполненная разгрузка создает оболочку полости, выносящую напряжения из зоны экскавации вглубь массива. Такая разгруженная от напряжений оболочка служит действенным средством для борьбы с внезапными выбросами (см. главу 3). Разгрузка туннеля большого сечения иногда обеспечивается строительством параллельных ему малых туннелей.

Эффективность разгрузочных методов зависит от вида экскавации или геометрии разрушаемой зоны:

- разгрузка строящихся полостей (включая стволы) обычна и успешна. Несколько компаний имеют соответствующие стандарты производства этих работ: параметров бурения, плана расположения скважин, вида взрывчатого вещества, порядка заряжания и деталей взрывания;

- разгрузка целиков, приствольных или оставленных в выработанном пространстве, часто выполняется на индивидуальной основе и использует метод проб и ошибок или исторический опыт подобных работ.

Разгрузка целиков не всегда бывает успешной и поэтому требует внимательного подхода к определению целесообразности этих работ. Следует также иметь в виду, что при разгрузке целиков воспринимаемые ими напряжения могут передаваться соседним целикам.

В последние годы испытывается одна из наиболее гипотетических технологий – разгрузка неоднородностей массива

напорной инъекцией воды. Ее механизмы пока недостаточно поняты, но получены некоторые интересные результаты.

На рис. 1.32 и 1.33 приведены примеры поведения пород в выработках туннельного типа шахт Южной Африки на большой глубине (более 3000 м) в условиях высоких напряжений.

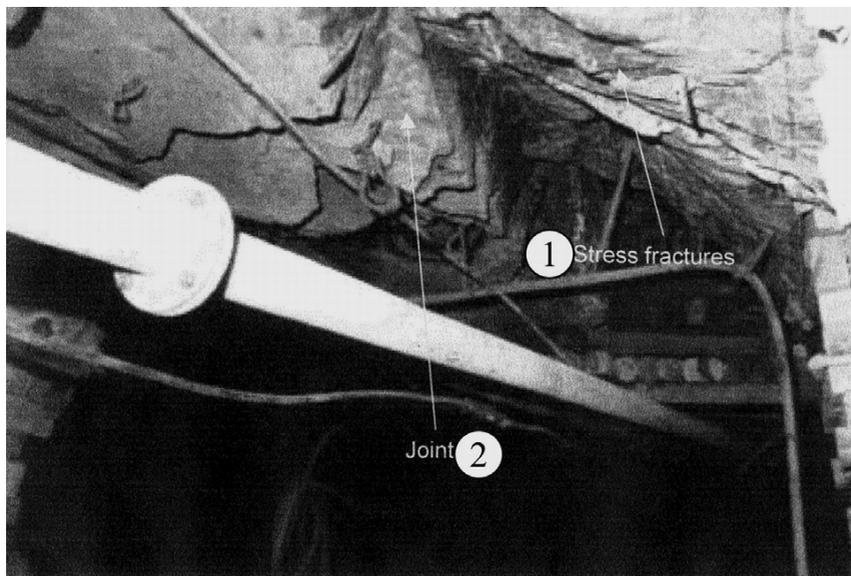


Рис. 1.32. Клинообразная форма породного блока, вызванная взаимодействием сочленений и напряженного трещинообразования

1 – напряженные трещины; 2 – сочленение.

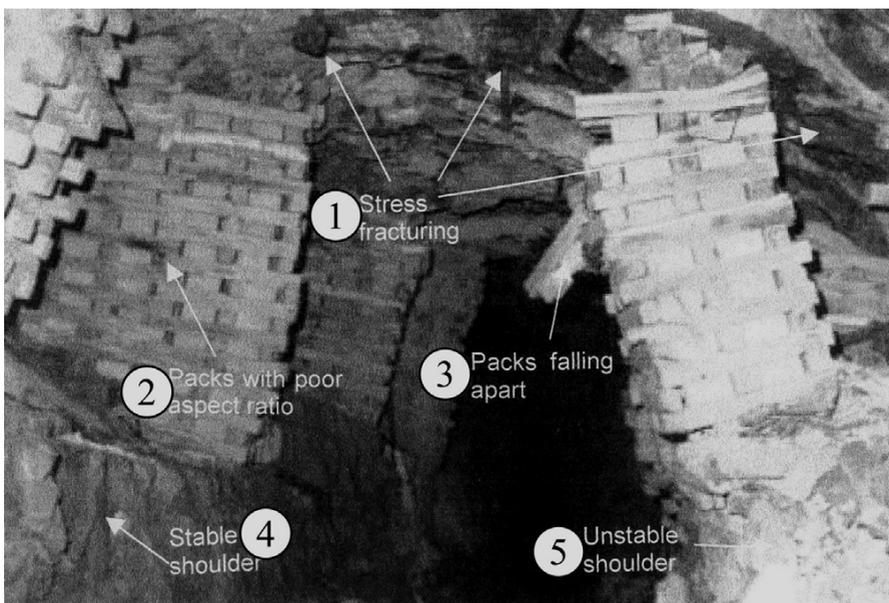


Рис. 1.33. Типичные условия штрека, находящегося под влиянием высоких напряжений

1 – напряженное трещинообразование; 2 – костер с неправильным соотношением размеров; 3 – разрушающийся костер; 4 – стабильная опора; 5 – нестабильная опора.

Глава 2. Природа и механизм внезапных выбросов пород

2.1 Общие сведения

Внезапные выбросы пород – это неожиданное и мгновенное отторжение породных фрагментов от контура подземной полости, происходящее в высоко напряженном массиве. Такие отторжения повреждают полости, а из-за большой скорости разлетающиеся фрагменты приводят к травматизму и даже смертельным случаям персонала, ущербу оборудования и подземного хозяйства предприятия.

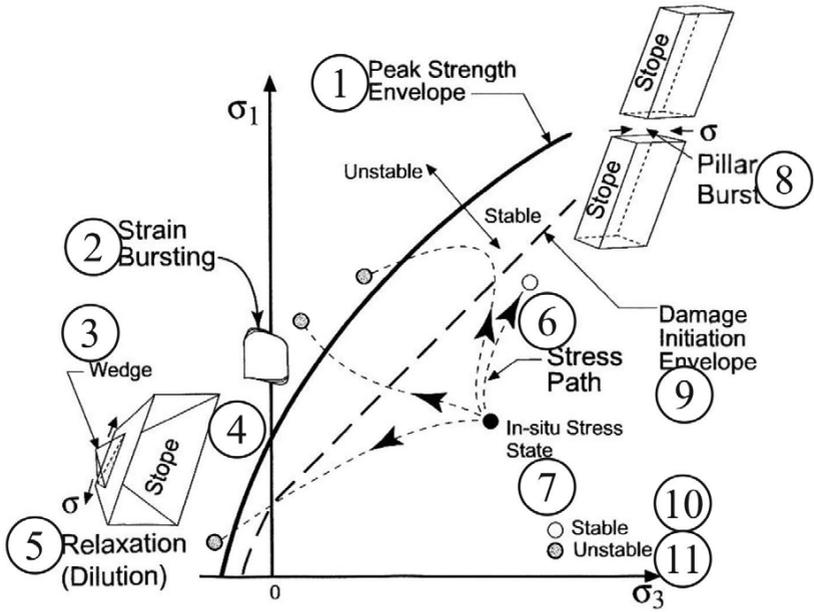
Сегодня термином «внезапный выброс» обычно определяется сейсмическое событие, при котором в подземной полости обрушается более 5 т пород. События меньшего масштаба относятся просто к «шуму».

Внезапные выбросы вызываются высокими напряжениями в твердых породах (рис. 2.1). Последние описываются в литературе как «кристаллические» или «упругие», т.е. противоположные «пластическим» породам, которые имеет скорее тенденцию сжиматься («ползти»), чем внезапно отторгаться. Когда напряжения достигают предела текучести, твердые породы могут быть описаны, как «хрупкие» или «жесткие».

Далее приводятся объяснения причин внезапных выбросов, предложенные разными авторами, имеющими многолетний опыт исследования этих явлений:

- все породы на глубине находятся в состоянии сжатия и ожидают возможности расширяться. Давления, встречаемые в ходе горных работ, так велики, что замкнутая в породах потенциальная энергия огромна. Порода, внезапно высвобождающаяся от напряжений, расщепляется и это делает ее обрушение взрывоподобным и ответственным за термин «внезапный выброс»;

a)



b)

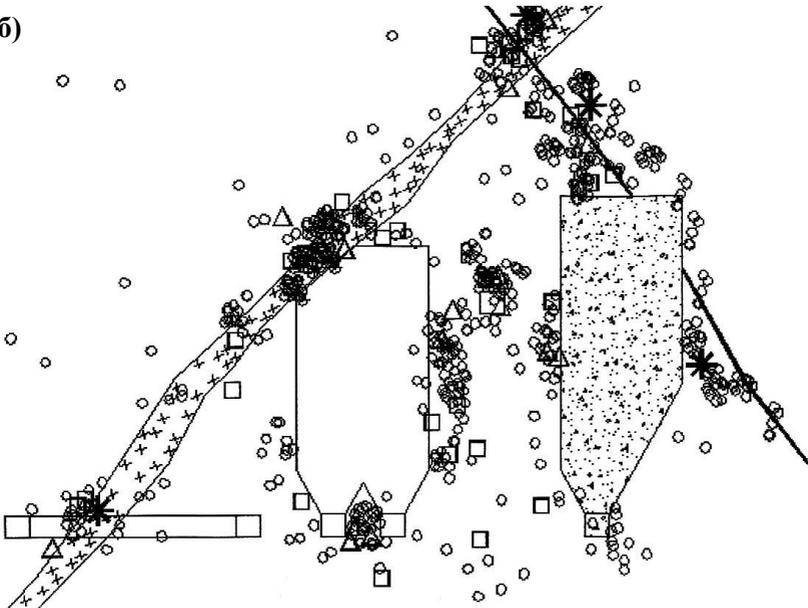
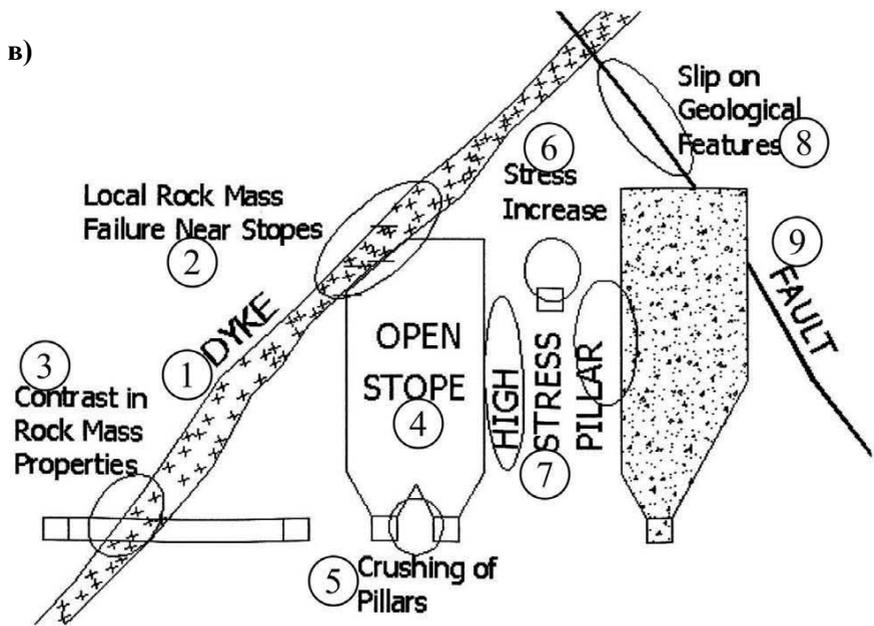


Рис. 2.1. Напряжения и сейсмичность вокруг подземных полостей



Г)



Рис. 2.1. Напряжения и сейсмичность вокруг подземных полостей (окончание)

Объяснения к рис. 2.1:

а) схема возможных напряжений вокруг подземных полостей.

1 – контур пиковой прочности; 2 – напряженный выброс; 3 – клин; 4 – уступ; 5 – ослабление; 6 – траектория напряжений; 7 – состояние напряжений в массиве; 8 – выброс в целике; 9 – контур возникновения повреждений; 10 – стабильный; 11 – нестабильный.

б) гипотетическая сейсмическая активность, связанная с типичной шахтой;

в) сейсмические источники вокруг типичных подземных добычных работ.

1 – изверженные вторжения; 2 – обрушения локальных горных масс возле уступов; 3 – контраст в свойствах породных масс; 4 – открытый уступ; 5 – разрушение целиков; 6 – увеличение напряжения; 7 – сильно напряженный целик; 8 – скольжение по геологической неоднородности; 9 – нарушение.

г) нарушение в толще горных пород.

- хрупкое разрушение происходит, когда способность породы противостоять нагрузке уменьшается с увеличением деформации. Часто хрупкое разрушение связано с малой деформацией или ее отсутствием перед разрушением и, в зависимости от условий, может произойти внезапно и катастрофически. Внезапные выбросы в шахтах с твердыми породами дают наглядную иллюстрацию явления взрыва хрупкой трещиноватости;

- значительные сейсмические события, имеющие вид внезапных выбросов пород, связаны с главными геологическими структурами такими, как нарушения или изверженные вторжения, геологические контакты (плоскости напластования пород) и др.;

- поверхности таких неоднородных структур имеют шероховатости и включения, препятствующие их скольжению, и сохраняют большое количество энергии. Скольжение происходит, когда либо движущие силы превосходят силу сопротивления (трения) геологической структуры, либо нормальное сжимающее давление уменьшено или вообще удалено.

Эти классические описания причин внезапных выбросов, однако, не объясняют следующих фактов:

- выбросы происходят также, когда уровень напряжений существенно ниже предела прочности пород;
- выбросы происходят в шахтах, где качество пород далеко от хрупкости;
- наличие геологических неоднородностей не служит обязательным условием возникновения внезапных выбросов.

Современная сейсмология пытается разрешить перечисленные несоответствия общепринятой теории. Правдоподобное решение лежит в науке сопротивления материалов, где объясняется, что тонкая колонна, плита или оболочка могут разрушиться в результате прогиба задолго до того, как достигается предел упругости (yield stress). Это явление не определяется хрупкостью материала, оно происходит и в податливой стали. Местный прогиб (local buckling) – термин, используемый, если элемент структуры разрушается подобным образом. Когда значительная доля общей структуры разрушается мгновенно и катастрофически, применяется термин «общая нестабильность» (general instability). Разрушение такого вида характеризуется резким и насильственным обрушением, сопровождаемым мгновенным высвобождением энергии, одним из компонентов которой является громкий звук. Фактическое значение напряжения, вызывающего обрушение, предсказать невозможно. Единственно, что может быть определено и используется, как критерий безопасного дизайна, – минимальный уровень напряжений, при котором разрушение структуры может произойти.

Табл. 2.1 показывает наименьший процент оставшейся прочности на сжатие некоторых видов пород, при котором происходили сейсмические события.

Обычно внезапные выбросы происходят в глубоких шахтах, однако, они могут случиться и на подземных работах малой глубины. Отмечены, например, выбросы в строящихся туннелях под Нью-Йорком на глубине до 300 м.

Таблица 2.1 – Наименьший процент оставшейся прочности пород на сжатие перед выбросом

Вид пород	Базальт	Доломит	Гранит	Известняк	Песчаник	Сланец
Процент прочности на сжатие	16	8	13	10	33	25

Когда главные условия выброса созданы, требуется механизм, необходимый для его проявления – раскрытие трещин, первоначально направленных в соответствии с основными напряжениями. При наличии открытых поверхностей (стен подземной полости) трещины распространяются параллельно этим поверхностям, а после достижения определенной длины растут нестабильно. Это может привести к отделению слоев породы от массива. Сама по себе одиночная трещина, вероятно, не станет ответственной за обрушение, но из-за роста трещин их взаимодействие может привести к достижению породой уровня нестабильности и аварии.

С энергетической точки зрения при подземной экскавации в ее окрестности происходят существенные изменения в энергии деформации массива (см. главу 1). Потенциальная энергия породы, извлеченной при экскавации и поднятой на поверхность, увеличивается пропорционально ее массе, гравитационному ускорению свободного падения и глубине, с которой порода поднята.

Наоборот, потенциальная энергия оставшихся нетронутыми пород вокруг зоны экскавации уменьшается за счет снижения природных сил сцепления, которые существовали в зоне экскавации перед тем, как часть породного массива была отделена. Если дальняя зона напряжений остается при этом постоянной и порода ведет себя упруго, а перемещения поверхности полости неочевидны, часть уменьшенной потенци-

альной энергии пород вокруг зоны экскавации сохраняется, как концентрация упругой энергии деформаций в породах этой зоны. Остальная часть потенциальной энергии рассеивается или высвобождается. Если породы ведут себя неупруго или полость экскавации смыкается, в качестве упругой сохраняется меньшая часть потенциальной энергии деформаций, а остальная (большая часть потенциальной энергии) рассеивается или высвобождается.

Одно из объяснений происхождения внезапных выбросов пород заключается в том, что они являются нестабильными формами высвобождения потенциальной энергии пород вокруг зоны экскавации. Другое объяснение предполагает, что изменения, индуцированные горными работами, служат только триггером (спусковым механизмом) остаточных сейсмических событий, вызываемых, главным образом, энергией напряжений, причиной которых являются геологические различия в состоянии породного массива. Оба эти объяснения могут быть правильными.

Первые сведения о внезапных выбросах пород появились в конце 19 века, когда в шахте Kolar Gold Field, Misor, Индия горные работы по добыче золота велись на глубине 500м. Несколькими годами позднее эта же проблема возникла в шахтах района Witwatersrand, Южная Африка. В Китае выбросы были отмечены в 1933 г., а с 1949 г. там произошло более 2000 таких событий.

В США первые выбросы случились в шахте Atlantic, Michigan в 1904 г., а наибольшая сейсмическая активность наблюдается в районе Coeur d'Alene, штат Idaho, где внезапные выбросы пород происходят, начиная с 1930 г. В период с 1986г. по 1990 г. внезапные выбросы стали причиной 23 несчастных и 6 смертельных случаев. Оцениваемая стоимость ликвидации последствий выбросов находится в пределах 8-18% от общей стоимости добычи. В главе 5 описана работа шахт этого района.

Сейсмической опасностью характеризуется также северная часть Канады. Так, в провинции Ontario за период с 1984 г. по 1987 г. зарегистрированы 46 малых землетрясений с магнитудой до 3,6 по Рихтеру. Здесь за то же время произошли более 250 внезапных выбросов пород, из которых 6 находилось в интервале магнитуд от 3,4 до 4. В 1958 г. В результате крупного внезапного выброса была потеряна шахта Cumberland № 7 в провинции Nova Scotia, когда погибли 75 человек. Событие 1984 г., которое стало причиной гибели 4 человек, привело к закрытию шахты Falconbridge, Sudbury. Сейсмическая активность является особой заботой в шахтах, добывающих поташ в районе Saskatchewan и в медных шахтах New Brunswick.

Наибольший выброс в Северной Америке привел к обрушению сододобывающей шахты Solvay Trona, Wyoming, США 3 февраля 1995 г., которое сопровождалось оседанием поверхности в среднем на 0,5-1,0 м, распространившемся на площади от двух до нескольких десятков квадратных километров.

В Индии тяжелые выбросы пород продолжались при углублении горных работ в крутопадающих шахтах района Kolar и причинили повреждения их инфраструктуре – стволам, транспортным выработкам и добычным уступам. Результатом выбросов были многочисленные смертельные случаи и большой стоимостной ущерб.

В Австралии с внезапными выбросами встречаются в районе Kalgoorlie с ранних лет 20 столетия. С 1970 г. сейсмическая сеть в шахте Mount Charlotte показала около 20 сейсмических событий с магнитудой от 2,0 до 4,3. Однако, до середины 1990-х гг. проблемы, связанные с сейсмичностью и выбросами здесь не воспринимались, как достаточно серьезные. С этого времени усовершенствованные системы мониторинга были установлены в нескольких шахтах района Yilgarn Block западной Австралии, шахтах Mount Isa, Broken Hill и Northparker в восточной Австралии.

В Южной Америке внезапные выбросы стали очевидны, как серьезная проблема в течение последних 20 лет, например, в крупнейшей медной шахте El Teniente, Чили, которая главную добычу стала получать из зон твердых пород рудного тела.

Из всех горнодобывающих стран ни одна не сталкивается с проблемой внезапных выбросов пород так часто, как Южная Африка в своих золотодобывающих шахтах, и ни в одной из них не возникает таких же тяжелых последствий (рис. 2.2). Здесь при пике продукции в 1970 г. добывалась 1000 т золота общими усилиями 416000 трудящихся. В течение года обрабатывалась общая площадь 28 км² залежей на средней глубине 2000 м. Двадцать лет назад общая добыча составила 620 т золота в год, что потребовало участия 477000 человек. В этот период в течение года во внезапных выбросах было потеряно 129 жизней со средним показателем 0,27 на 1000 чел. персонала.

Данные за 2003 г. показали, что при добыче 311 т золота и занятости 183000 чел. в результате внезапных выбросов пород погибли 37 рабочих со средним показателем 0,2 на 1000 чел. Из этих цифр видно, что имеется некоторое улучшение обстановки, несмотря на неизбежную тенденцию увеличения трудностей добычи с ростом глубины работ.

Особенностью золотодобывающей индустрии Южной Африки является разработка на большом простирании одного и того же рудного тела несколькими смежными шахтами. Отсюда следует, что одновременному воздействию подвергается очень большая площадь земной коры. При этом большие нарушения с длиной до десятков километров иногда активизируются с проскальзыванием по ним массива на несколько сот миллиметров, чем создаются сейсмические события с величиной магнитуды до 5,1, которые служат причиной повреждений не только подземных полостей, но и строений на поверхности.

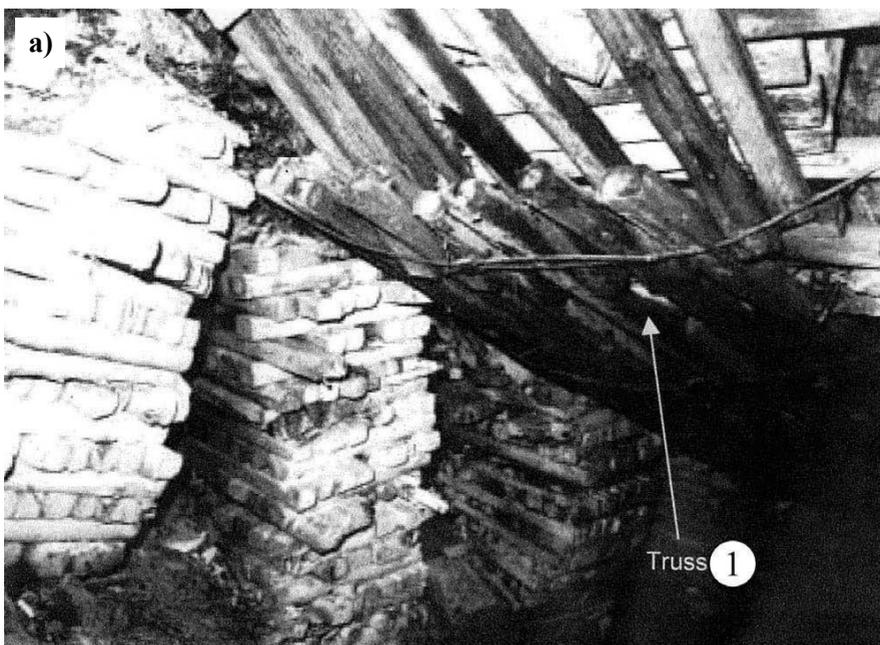


Рис. 2.2. Состояние выработки, поддерживаемой продольными балками и кострами

В)



Рис. 2.2. Состояние выработки, поддерживаемой продольными балками и кострами (окончание)

Объяснения к рис. 2.2:

а) в штреке до выброса.

1 – балка.

б) в штреке после выброса.

в) в туннеле после выброса.

Период около столетия, который прошел со времени появления первых выбросов на шахтах Южной Африки, может быть разделен на два этапа. В первом из них, который закончился в конце 1940-х гг. руководство шахт полагалось, главным образом, на традиционный инженерный подход: наблюдения, опыт и осмысливание, вслед за чем предпринимались практические попытки. Одним из наиболее важных было предложение о применении длиннозабойной системы разработки, которая, однако, была широко распространена только спустя много лет.

К ранним 1950-м гг. становится все более очевидным, что чисто практические старания решить проблему выбросов оказались неэффективными. Предложенные решения были всегда предметом компромисса и даже противоречили друг другу. Например, методы управления горным давлением, предназначенные минимизировать внезапные выбросы, ранжировались от закладки выработанного пространства с максимально возможной плотностью до полного обрушения кровли. Отсюда видно, что потребовалось новое качественное и количественное понимание проблемы, которое привело к началу этапа борьбы с внезапными выбросами, включающего:

- начальные исследования;
- разработку противодействующих мер;
- применение противодействующих мер;
- дальнейшие исследований.

На первой стадии проводились сбор данных о возникновении выбросов и их обработка методами статистического анализа. Эти работы были направлены на установление взаимоотношений между добычными (а также подготовительными

ми) работами и наблюдавшимися сейсмическими событиями. Одновременно с наблюдениями выполнялись интенсивные лабораторные исследования с целью выяснения поведения напряженных пород, их деформационных характеристик и механизма обрушения хрупких пород.

Применение сейсмометров в поздних 1950-х гг. показало, что число наблюдаемых сейсмических событий значительно превышает число зарегистрированных внезапных выбросов пород. Независимо от этих исследований некоторые математические работы рассматривали, может ли теория упругости описывать поведение пород, окружающих полость экскавации. Сравнение измеренных и рассчитанных компонентов смещения пород, вызванного горными работами, показало, что теория упругости – модель, способная отразить поведение большинства крепких пород, в которых залегают рудные месторождения Южной Африки и других, схожих с ними районов. Только трещиноватые породы, непосредственно примыкающие к полости экскавации, не соответствуют поведению упругой среды и должны быть исключены из соответствующего анализа.

В ходе второй стадии изучения проблемы сейсмичности предлагались практические меры противодействия внезапным выбросам пород, которые могут быть разделены на стратегические и тактические (см. главу 3).

При реализации последующих стадий огромную роль играла разработка новых концепций и уровней менеджмента, включая подготовку нового поколения инженеров-специалистов по механике пород, которые могут руководить выбором защитных мер. Сегодня все главные золотодобывающие компании имеют таких специалистов. Планирование горных работ выполняется ими с учетом сравнения и ранжирования опасностей сейсмических рисков, возникающих при возможных технологических альтернативах.

Рассмотрение мирового опыта внезапных выбросов пород показывает, что эти сейсмические события могут быть ранжированы согласно табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Ранжирование сейсмических событий

Магнитуда по Richter, M_L	Кинетическая энергия, МД	Взрывчатый эквивалент, кг	Радиус источника, м
-1	0,002	0,04	0,8
0	0,06	1,2	2,6
1	2,0	40	8,5
2	60	1200	26
3	2000	40000	84
4	60000	1200000	270

Важное значение в изучении сейсмических событий имеет терминология, определяющая основные понятия этих породных явлений.

В английском языке слово «burst» - выброс предполагает более насильственный, мгновенный, внезапный процесс, чем «rock fall» - падение (обрушение) пород или даже «collapse» - сильное обрушение, обвал. Немецкий термин «gebirg-slagge» - «горный удар» и французское выражение «coup de terrain» - «удар земли» подобны по обозначениям мощи и силы. Испанское название «estallido de roca» буквально переводится, как «взрыв породы». Все эти термины происходят от очевидной неожиданности и разрушительности интенсивного удара, обладающего неожиданной силой и вызывающего взрывообразный разрыв породного массива.

В разных странах исследователи внезапных выбросов используют собственные определения и классификационные системы для описания вида и тяжести последствий. Большинство этих терминов имеют качественный характер и не базируются на какой-либо формализованной системе, но основаны на интенсивности событий, разнице мест возникновения

выбросов по отношению к горной геометрии или на видах повреждения пород – отслоении, расщеплении, разрушении и т.д. Такая формализация описательной терминологии полезна и необходима в локальных районах или странах, либо даже в сообществах, выполняющих отдельные конкретные виды подземных операций или добывающих конкретные материалы. Однако, подобные системы, вероятно, недостаточно точны в терминах фундаментальной физики или механики, чтобы использоваться, как базис для структурирования и руководства при исследованиях.

Большинство специалистов, вовлеченных в эту проблему, могли бы согласиться, что желательно иметь общую терминологию и стандартные определения. По одному из них внезапный выброс пород определяется, как «...внезапное и иногда насильственное высвобождение накопленной энергии, когда объем пород напрягается сверх предела упругости. Внезапные выбросы могут быть классифицированы, как напряженные, разрушительные или скользящие. Первый из них является небольшим и локализованным, тогда как два других могут вызвать разрушение выработок туннельного типа или добычных уступов».

По другому определению внезапный выброс характеризуется более широко, как «...любой вид явления с высвобождением (разгрузкой) напряжений, которое вызывается горнодобывающей деятельностью и проявляется в эмиссии сейсмических сигналов».

В Южной Африке сейсмическое событие понимается, как «...переходная энергия, высвобождаемая внезапным трещинообразованием или разрушением породного массива, что проявляется в эмиссии сейсмической вибрации, распространяемой через породы. Внезапный выброс определяется, как значительное повреждение, причиняемое сейсмическим событием при подземной экскавации».

2.2 Классификация сейсмических событий

Вскоре после первых регистраций выбросов породы были разработаны классификационные системы их оценки. За главный критерий принимался размер ущерба, но учитывались также амплитуда и продолжительность ощущения вибраций. Легкой категорией считался выброс менее 10 т породы, средней – 10-50 т, тяжелой – более 50 т. Независимо от величины ущерба, регистрируются также выбросы, приводящие к травмам или смертельным повреждениям персонала.

Эти оценки в ранних 1980-хх гг. были дополнены значением «магнитуда», применяемым к любым сейсмическим событиям, например, землетрясениям. Величина магнитуды – относительная оценка силы события, основанная на измерениях максимального перемещения его субъекта. Наиболее широко для таких оценок применяется шкала Рихтера (Richter) и шкала Наттли (Nuttli), которая обычно используется в восточной Канаде.

Шкала Рихтера является логарифмической. Это означает, что каждый следующий шаг в шкале в 10 раз увеличивает оценку сейсмического события. В такой шкале события могут иметь также отрицательные значения магнитуды.

К примеру, для рудных шахт, работающих в условиях крепких пород, или подземных объектов, строящихся в подобных условиях, сейсмические события могут быть следующими:

- малые, расположенные в диапазоне по Рихтеру от -3 до -2. Эти события могут быть услышаны, как хлопок или удар, на тихом рабочем месте, но могут быть неощутимы или ощущаться только, как слабые вибрации. События этого размера не определяются большинством шахтных сейсмических систем мониторинга;

- средние, имеющие по Рихтеру магнитуду равную -1, могут звучать, как громкий хлопок или удар. Событие будет слышно и замечено на расстоянии более сотни метров от ис-

точника. На тихом рабочем месте такое событие может испугать большинство людей;

- большие, имеющие по шкале Рихтера магнитуду равную 0, могут звучать подобно очень близкому удару грома или выстрелу. Такие события обычно слышны по всей шахте и могут ощущаться на поверхности (в нескольких сотнях метров от источника). Возникающие вибрации аналогичны вибрациям при взрывных проходческих работах;

- очень большие, имеющие по шкале Рихтера магнитуду равную 1 или 2, определенно ощущаются на поверхности, имеют вибрацию равную массовому взрыву при добычных работах по отбойке руды. Региональные сенсоры землетрясений часто могут зарегистрировать событие с такой магнитудой.

В табл. 2.3 приведены субъективные параметры ощутимости сейсмического события в зависимости от его магнитуды.

Таблица 2.3 – Степень ощутимости сейсмического события при горных работах

Магнитуда по Рихтеру	Степень ощутимости
1	2
-3,0	<ul style="list-style-type: none">- малые удары или толчки, услышанные вблизи источника. Обычно такие события могут быть услышаны только относительно близко к источнику;- событие слышимо, но вибрации слишком малы, чтобы быть ощутимы;- событие не определяется большинством шахтных сейсмических систем.
-2,0	<ul style="list-style-type: none">- значительные вибрации пород;- событие ощущается, как глухой звук или рокот (может быть ощутимо на расстоянии более 100 м);- событие часто определяется сейсмическими системами шахтного мониторинга.

Продолжение таблицы 2.3

1	2
-1,0	- событие ощущается персоналом шахты или строительства; - вибрации пород ощущаются близко к событию, как взрывные работы; - событие определяется сейсмическими системами шахтного мониторинга.
0,0	- вибрации ощутимы и слышны во всей шахте; - удар может быть ощутим (но не услышан) на поверхности в сотнях метров от события; - вибрации ощутимы на поверхности подобно взрывным работам в подготовительных забоях.
1,0	- событие ощутимо и слышно очень отчетливо на поверхности; - вибрации ощутимы на поверхности подобно добычным взрывам в рудной шахте; - событие может быть зарегистрировано региональными сейсмическими системами, расположенными в сотнях километров от события.
2,0	- вибрации ощутимы на поверхности сильнее, чем большой добычной взрыв; - событие регистрируется геологической наукой.

В настоящее время наиболее распространенной классификацией сейсмических событий, результатом которых может быть внезапный выброс пород, считается основанная на определениях:

- сейсмического события, как внезапного высвобождения потенциальной или хранимой сейсмической энергии пород, излучаемой, как сейсмические волны;
- внезапного выброса пород, индуцированного горными работами сейсмического события, вызывающего повреждения подземных полостей.

Сводка факторов, влияющих на возникновение внезапного выброса, показан на рис. 2.3.

Существует два общих вида сейсмических событий:

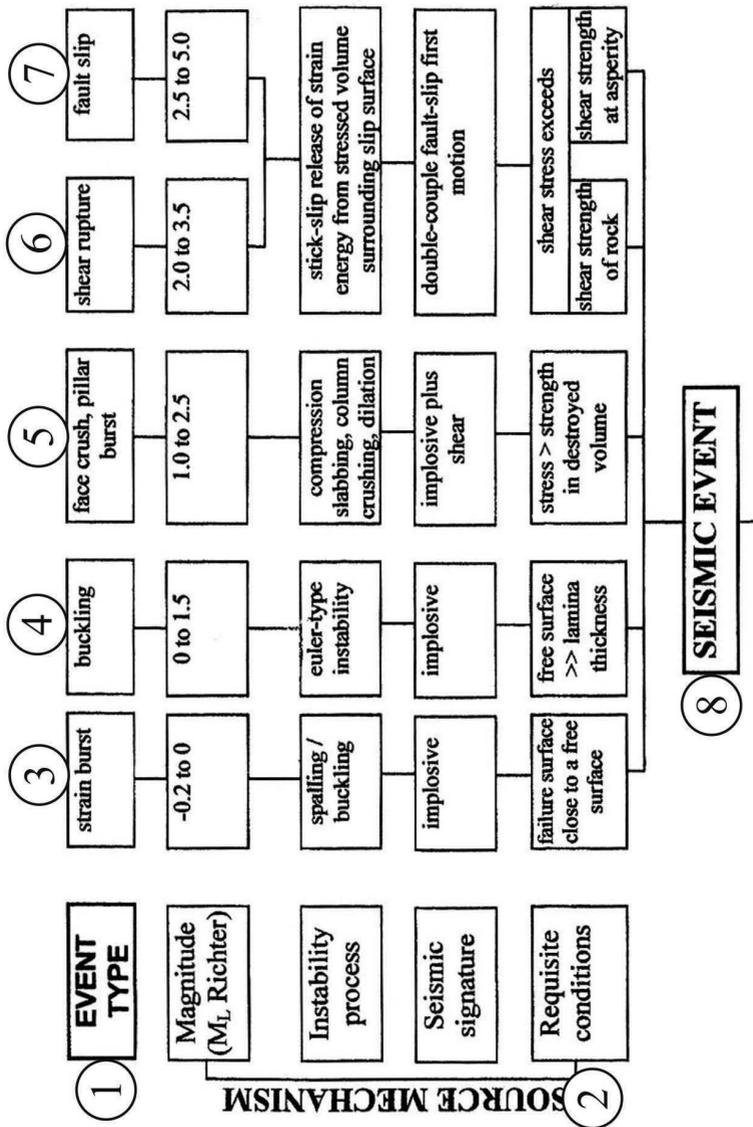


Рис. 2.3. Сводка факторов, влияющих на возникновение внезапного выброса пород

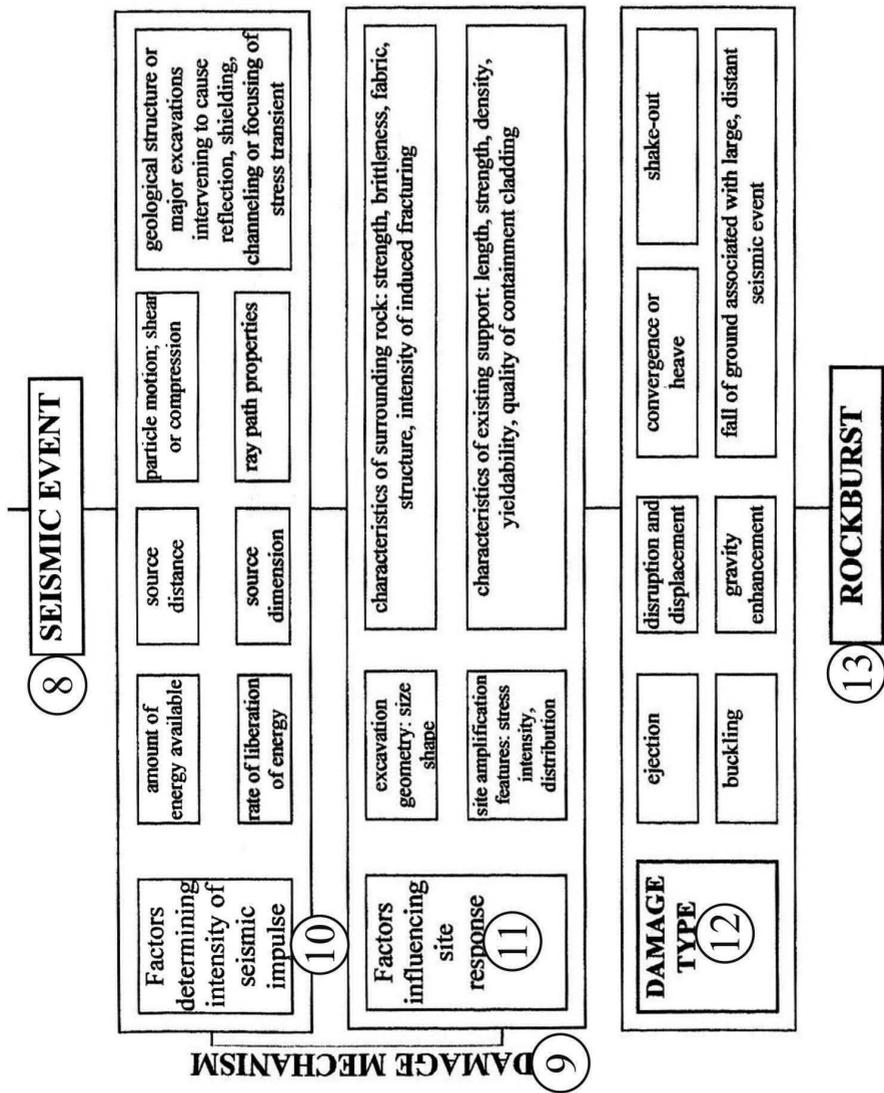


Рис. 2.3. Сводка факторов, влияющих на возникновение внезапного выброса пород (окончание)

Объяснения к рис. 2.3:

1 – вид события; 2 – механизм источника: магнитуда по Рихтеру, процесс нестабильности, признаки сейсмичности, необходимые условия; 3 – напряженный выброс: от $-0,2$ до 0 ; расслоение/прогиб; раздавливание, обрушение открытой поверхности; 4 – прогиб: от 0 до $1,5$; нестабильность Эйлера; раздавливание; открытая поверхность намного больше толщины расслоения; 5 – разрушение забоя, выброс в целике: от $1,0$ до $2,5$; отслаивание сжатием; разрушение колонн; ослабление; раздавливание плюс срез; напряжение превышает прочность в разрушенном объеме; 6 – разрушение при сдвиге: от $2,0$ до $3,5$; высвобождение напряженной энергии объема пород при механизме «прилипание – скольжение»; скольжение нарушений; превышение прочности пород напряжением среза; 7 – скольжение нарушений: от $2,5$ до $5,0$, далее, как в позиции 6; 8 – сейсмическое событие; 9 – механизм повреждений; 10 – факторы, определяющие интенсивность сейсмического импульса: количество потенциальной энергии, темп высвобождения энергии; расстояние от источника, размер источника; движение частиц: срез или сжатие, особенности траектории луча; геологическая структура или влияние экскавации на неустойчивое состояние напряжений; 11 – факторы влияния места работ: геометрия экскавации – форма, размеры; влияние особенностей места работ на распределение напряжений; характеристика окружающих пород: прочность, хрупкость, строение, интенсивность индуцированной трещиноватости; характеристика существующей крепи: размер, прочность, плотность установки, податливость, качество наружного покрытия; 12 – вид повреждения: отторжение, прогиб, разрушение и перемещение, увеличение уровня опасности; конвергенция или вспучивание, сотрясения, обрушение породы, связанное с большими сейсмическими событиями; 13 – внезапный выброс пород.

- непосредственно связанные с рабочим пространством производства работ;
- связанные с перемещением породного массива в геологических неоднородностях.

Первые из них происходят в близком соседстве с экскавацией и являются прямым результатом напряжений, распре-

деленных вокруг экскавации. Очевидно, такие события происходят, когда напряжения максимальны. Этот вид события характеризуется совпадением мест высвобождения энергии и повреждений и включает следующие формы разрушения пород:

1) Напряженный выброс (strain burst) – вероятно, наиболее обычная форма, как для шахт, так и для гражданских подземных структур. Этот термин используется, чтобы описать событие насильственного внезапного обрушения, где относительно небольшие фрагменты пород отторгаются от границ экскавации. Повреждения выражаются также в расслоении и образовании плит на поверхности пород (рис. 2.4), откуда следует, что существующие геологические неоднородности могут не принимать участия в процессе. Отторгнутые породные фрагменты обычно имеют малую толщину и острые края. Если породы в зоне экскавации плотно соединены в блоки, разрушение не распространяется в нетронутые породы, но выражается в прогибе тонких наслоений поверхности массива.

2) Выброс в целике (pillar burst) – термин, используемый для обозначения внезапного разрушения целика, что является результатом перераспределения локальных напряжений. Повреждения, возникающие при выбросе в целике, определяются расположением последнего и состоянием окружающих пород и соседних целиков. Количество высвобождаемой энергии при выбросе в целике намного больше, чем при напряженном выбросе и излучаемая сейсмическая волна может вызвать повреждения в других районах, например, в зонах ослабленных пород. Внезапная потеря опорной функции одним целиком вызывает перераспределение напряжений в других ближайших целиках, которые, в свою очередь, могут внезапно разрушиться в зависимости от их расположения, геометрических и прочностных характеристик (рис. 2.5). Результатом события в таком случае станет «эффект домино», который выведет из строя целый участок шахты.



Рис. 2.4. Расслоение и трещиноватость на поверхности туннеля

Сейсмические события с движением породного массива в геологических нарушениях также служат результатом перераспределения напряжений от горных работ, но имеют больший масштаб. При развитии шахты все ее новые районы подвергаются такому перераспределению. Это может привести к

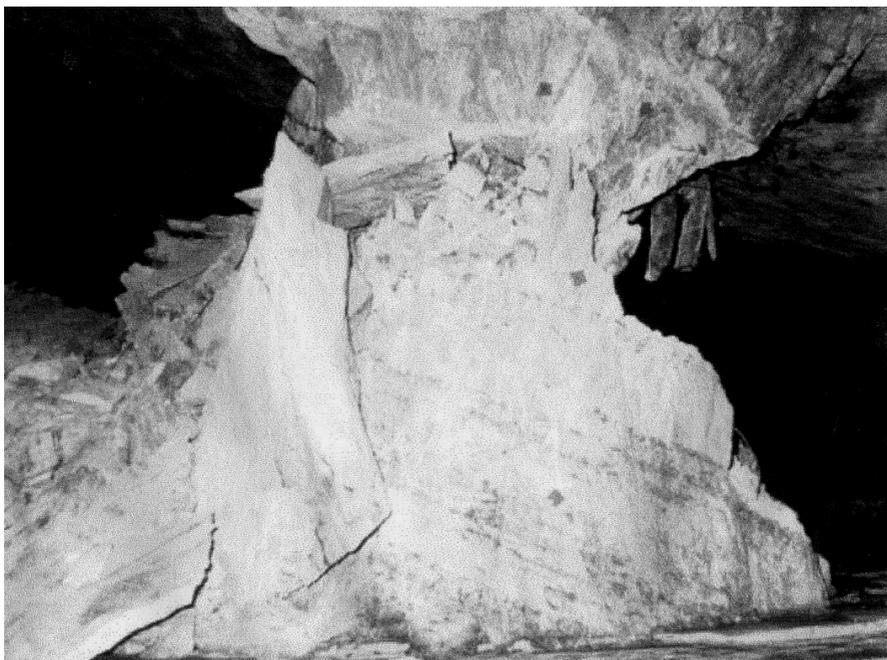


Рис. 2.5. Разрушение целика в кварците

реактивации нарушений в регионе или внезапному формированию новых трещин в нетронутых породах (рис. 2.6). Наиболее общим видом таких крупномасштабных сейсмических событий является скольжение плоскостей нарушения (*fault slip*), когда повреждения могут быть очень тяжелыми и происходить на большой площади.

Скольжение нарушения – термин, используемый для описания скольжения пород по геологической структуре. Горные работы могут влиять на нарушение двумя способами. Первый из них заключается в том, что экскавация уменьшает поперечные (нормальные к плоскости нарушения) сжимающие силы, и тем самым приводит к снижению сопротивления срезу вдоль нарушения. С другой стороны, горные работы увеличивают продольные силы, срезающие неровности и шероховатости, препятствовавшие относительно смещению

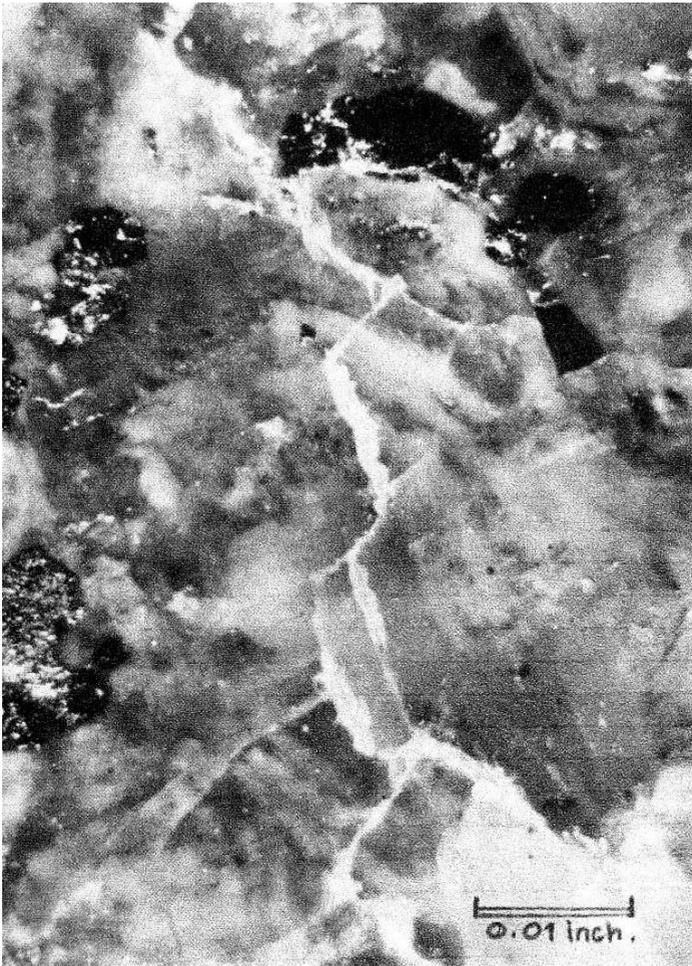


Рис. 2.6. Траектория трещины в кварците под воздействием осевого сжатия

плоскостей нарушения. В результате общего влияния описанных факторов происходит проскальзывание этих плоскостей.

Повреждения подземной полости причиняются энергией, высвобождаемой при таком проскальзывании. Последняя излучается, как сейсмическая волна и при воздействии на полость вызывает:

- отторжение блоков, сформированных их существующими сочленениями;
- большие сжимающие напряжения, приводящие к разрушению пород, за которым может последовать их отторжение;
- усиление напряжений растяжения у контура полости, которые приводят к отторжению разрушенных пород.

Иногда при описании внезапных выбросов используют термин «разрывное нарушение» (shear repture), применяемый, в основном, в Южной Африке и означающий разрыв нетронутых (intact) пород, который случается внезапно, вызывает излучение сейсмических волн и повреждения ближайшей экскавации. Это явление происходит, когда напряжение сжатия перед работающим забоем превышает прочность пород. Повреждения, возникающие при этом, похожи на результаты скольжения нарушений.

На рис. 2.7 показана еще одна классификация внезапных выбросов пород, состоящая из 6 их видов.

Сдвигения (скольжения) вдоль нарушений породного массива, индуцированные горными работами, могут вызвать сейсмическое событие с магнитудой 2,5-5,0, тогда как магнитуда напряженного выброса находится в пределах от -0,2 до 2,5. Это, однако, не влияет на размер повреждений, которые могут быть результатом любого вида выброса, поскольку они являются функцией расстояния между сейсмическим событием и повреждаемой полостью, размера зоны трещиноватости, образовавшейся в массиве и вида крепи, установленной в полости.

Примером возникновения основных видов сейсмических событий служит шахта Laky Friday, Idaho, США, где выбросы происходили, как в строящихся выработках, так и при ведении добычных работ. С 1982 г. по 1986 г. на глубине 1600-1800 м произошли 746 событий, из которых 71% был связан с напряжениями породного массива и 29% со сдвижением пород вдоль нарушенных зон (см. главу 5).

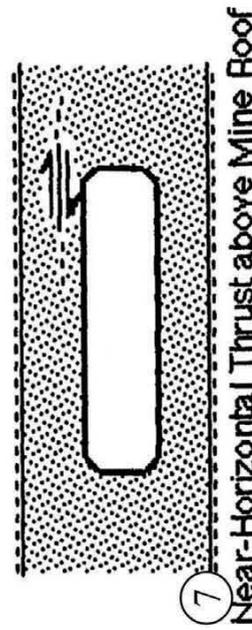
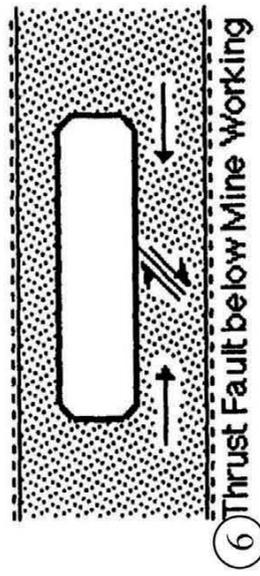
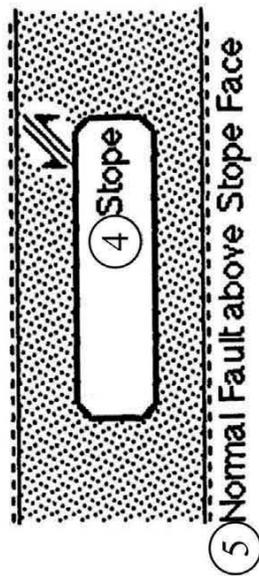
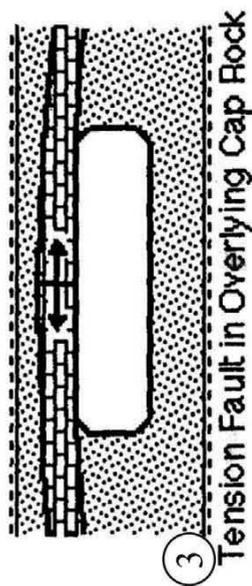
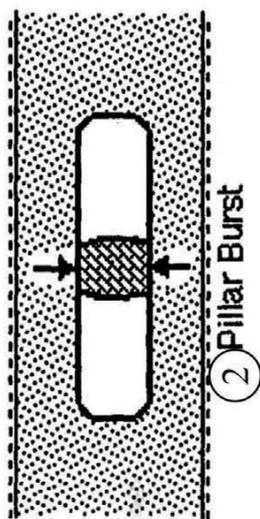
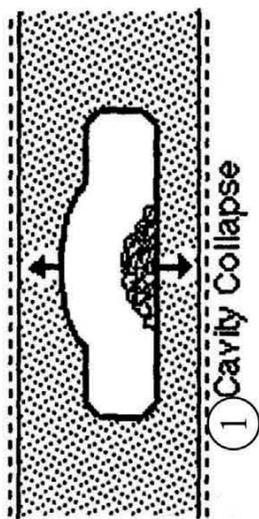


Рис. 2.7. Упрощенная модель механизмов выброса

Объяснения к рис. 2.7:

1 – обрушение полости; 2 – выброс в целике; 3 – напряжения в нарушении пород кровли; 4 – уступ; 5 – нарушение над забоем уступа; 6 – нарушение под горными работами; 7 – почти горизонтальный надвиг над кровлей полости.

Одна из классификаций сейсмических событий в туннелях приведена в табл. 2.4.

Таблица 2.4 – Классификация источников сейсмических событий в туннелях

Вид сейсмического события	Предполагаемый источник	Магнитуда
Напряженный выброс	Поверхностное расслоение с насильственным отторжением фрагментов	-2÷0
Прогиб	Выдавливание существующих больших плит параллельных поверхности полости	0÷1,5
Разрушение забоя	Насильственный выброс пород из забоя туннеля	1,0÷2,5
Разрывное разрушение	Внезапное распространение срезающей трещины через нетронутые породные массы	2,0÷3,5
Скольжение нарушения	Возобновляемое сдвижение существующего нарушения	2,5÷5,0

Еще одна система классификации сейсмических событий основана на оценке их магнитуды по Рихтеру и регистрациях сейсмографа. Так, события с магнитудой $M_L > 0,5$ и перемещающие в полости более 10 м^3 породы, показывают на сейсмографе пиковую амплитуду (всплеск сейсмограммы) более 30 мм. Эти сейсмические события классифицируются, как большие, и относятся к выбросам пород. Микросейсмические

или малые события перемещают менее $1-2\text{ м}^3$ материала в полость, имеют $M_L < 0,5$ и отмечаются амплитудой сейсмограммы менее 30 мм. Такие события обычно происходят в зонах вскрывающих и подготовительных выработок горизонтов (субгоризонтов) и вызывают растрескивание и отбрасывание малых породных фрагментов, сопровождаемое хлопками, а также расслоением окружающих породных масс.

Некоторые авторы предлагают в качестве базиса классификации сейсмического события или внезапного выброса расстояние от его источника до места воздействия. Так, к 1 типу по этой классификации относятся события с расстоянием 30-100 м от источника до действующего забоя (в зависимости от автора классификации), к 2 типу – события, непосредственно не связанные с ведением горных работ, т.е. те, источник которых находится на расстоянии 50-150 м от забоя или даже на расстоянии от нескольких сотен метров до 3 км.

Еще одна группа авторов предлагает классифицировать выбросы в зависимости от их отношения к ситуации горных работ и уровню напряжений. Здесь предполагается, что фундаментальной причиной всех сейсмических событий служит перераспределение напряжений в окружающих породах, зависящее от трех фаз горных работ – развития, активной добычи полезного ископаемого и событий, возникающих после добычных работ вне их зоны. Авторы этой классификации считают, что в первой фазе при проведении вскрывающих и подготовительных выработок напряжения еще до добычных работ уже достаточно велики, чтобы вызвать разрушения высвобождением энергии, хранящейся в массиве. На второй фазе события происходят в рудном теле, например, в опорных целиках из-за перераспределения и концентрации напряжений, вызванных добычными операциями. События третьей фазы происходят на некотором расстоянии от границ разрабатываемой части рудного тела и являются результатом региональных напряжений, перераспределение которых индуцировано шахтой в целом. Этот механизм всегда связан со сколь-

жением нарушений, но может не вызывать повреждений в шахтных полостях.

Существует система классификации, основанная на тяжести повреждений, причиняемых сейсмическим событием и его результатом – внезапным выбросом пород.

Так в табл. 2.2 приведены данные о соответствии взрывчатому эквиваленту разрушающего воздействия сейсмического события в зависимости от его магнитуды.

Кроме уровня магнитуды, последствия события определяются:

- расстоянием от источника события (рис. 2.8 а);
- пиковым ускорением и скоростью перемещения пород (табл. 2.5) (рис. 2.8 б, в). Пиковые ускорения изменяются в долях от ускорения свободного падения $g = 9,8 \text{ м/сек.}^2$;
- продолжительностью сотрясений, которая может вызывать усталостные разрушения конструкций крепи;

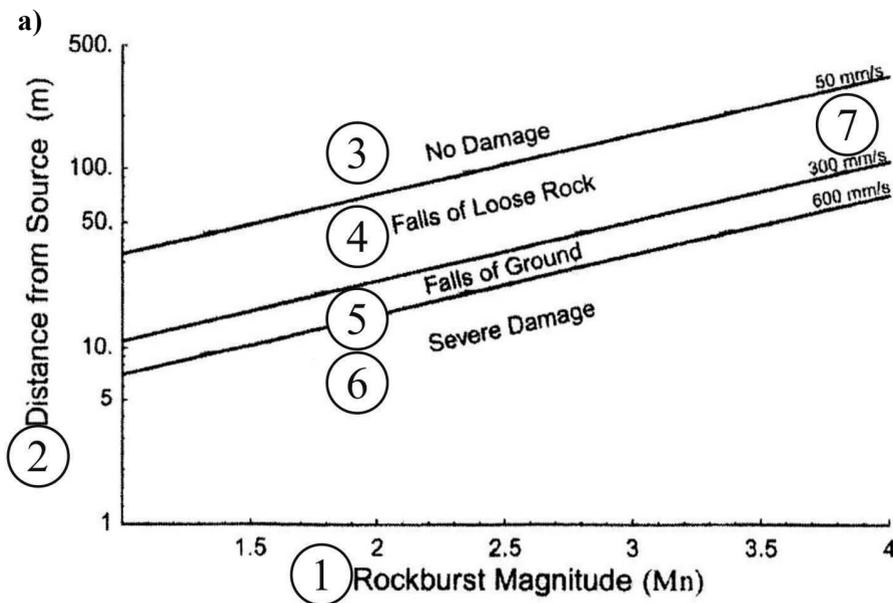


Рис. 2.8. Зависимости последствий внезапных выбросов породы

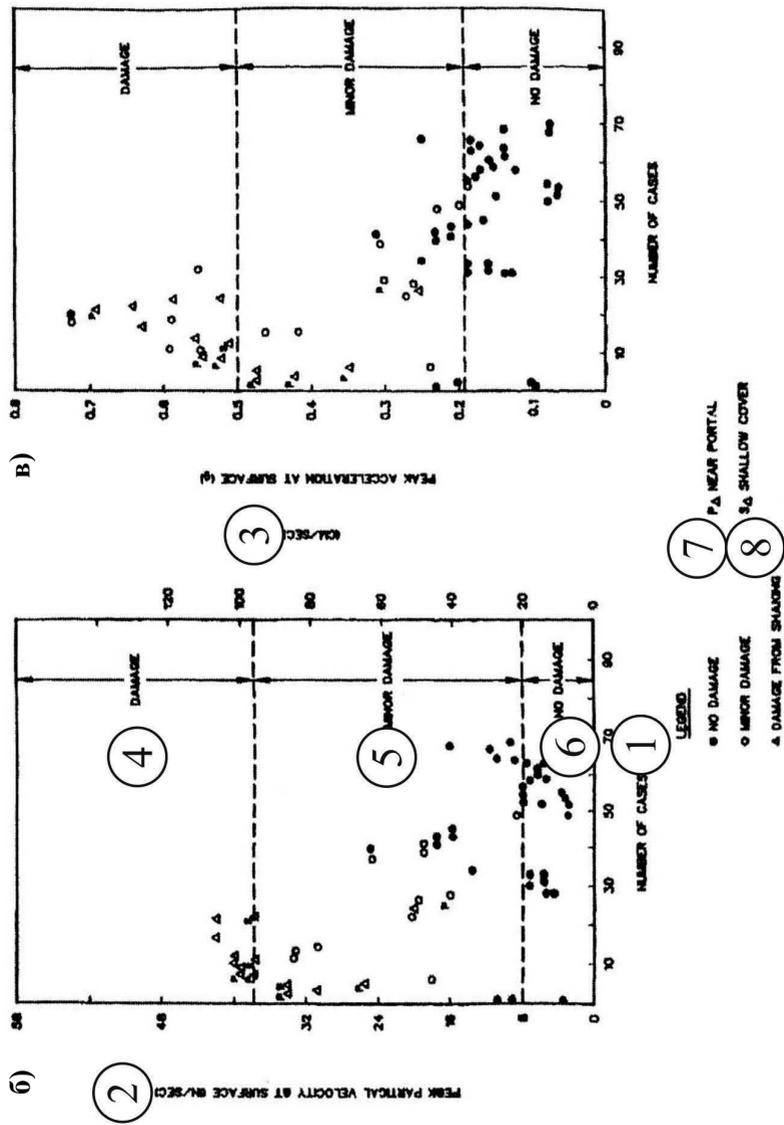


Рис. 2.8. Зависимости последствий внезапных выбросов породы (окончание)

Объяснения к рис. 2.8:

а) от магнитуды и расстояния до центра события.

1 – магнитуда; 2 – расстояние от центра события; 3 – отсутствие повреждений; 4 – обрушение пород; 5 – завалы; 6 – тяжелые повреждения; 7 – пиковые значения скорости колебаний пород.

б) от скорости колебаний пород.

1 – число случаев; 2 – пиковая скорость колебаний поверхности пород (дюймы/сек.); 3 – то же см/сек.; 4 – повреждения; 5 – слабые повреждения; 6 – отсутствие повреждений; 7 – возле портала; 8 – малое покрытие.

в) от ускорения поверхности пород.

- частотой сотрясений которая при высоких значениях может причинить локальное расслоение пород вдоль природных плоскостей ослабленности. Такие частоты (которые быстро снижаются с расстоянием) могут ожидать, главным образом, на малых расстояниях от источника;

- длиной сейсмической волны, особенно, когда ее величина составляет от 1 до 4 диаметров полости (туннеля).

В табл. 2.5 приведены сведения о последствиях внезапных выбросов пород в шахтах Южной Африки.

В Австралии принята следующая классификация повреждений, вызываемых внезапными выбросами пород:

А – повреждения не наблюдаются;

В – малые повреждения, вызываемые перемещениями пород, удерживаемых существующей, но деформированной крепью (например, провисшей металлической сеткой, согнутыми анкерными болтами). Форма, строящейся полости при таких повреждениях может быть восстановлена (рис. 2.9 а);

С – малые разрушения крепи. Металлическая сетка рывается, некоторые анкерные болты ломаются, выпадет менее 10 т породы. При таких повреждениях строящаяся полость может быть восстановлена (рис. 2.9 б);

Д – крупные повреждения крепи. Выпадает от 10 до 100 т породы. Восстановление полости вызывает проблемы (рис. 2.9 в);

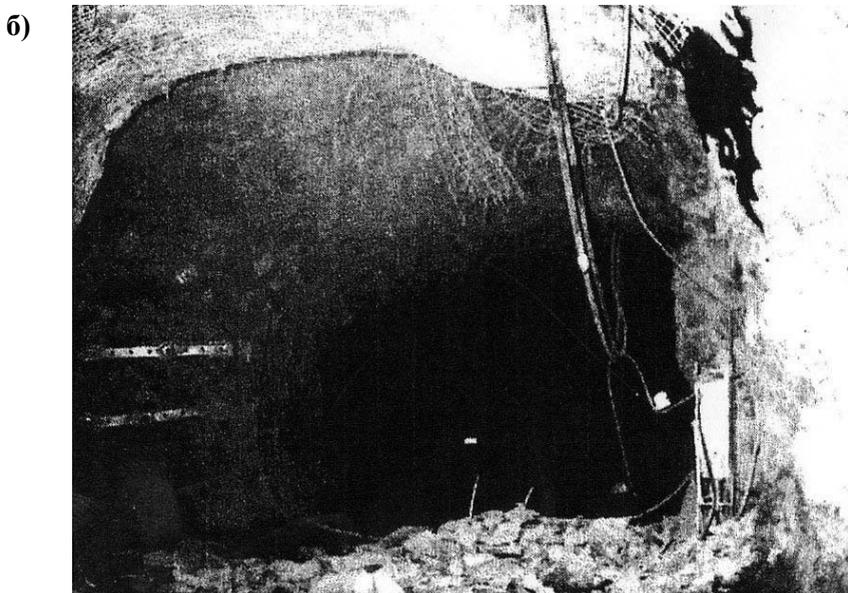
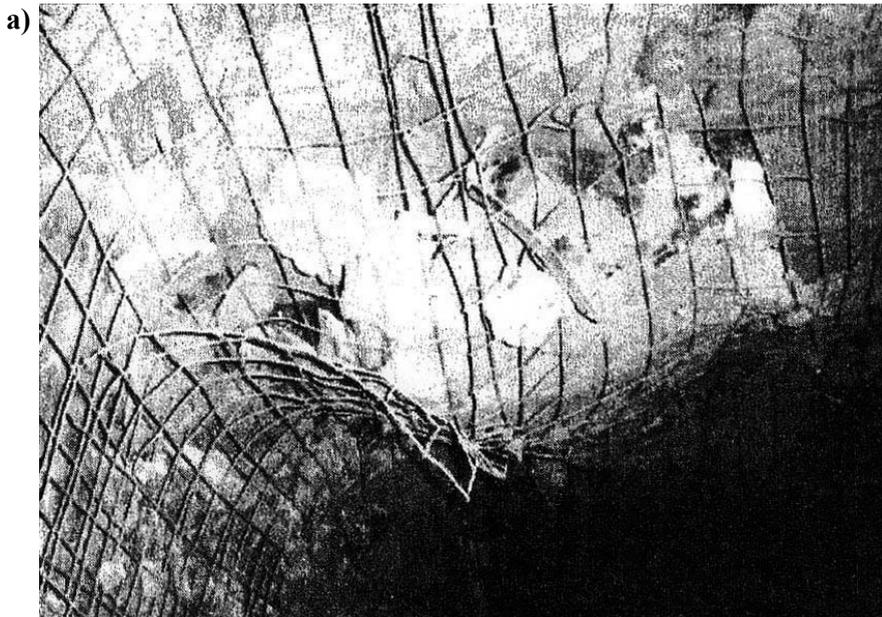


Рис. 2.9. Повреждения, вызванные внезапными выбросами пород (австралийская классификация)

в)



г)

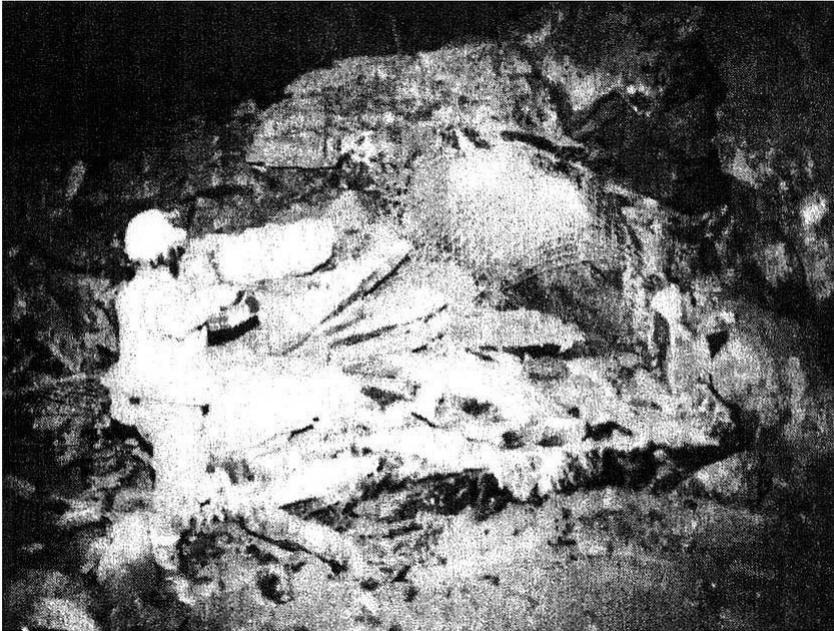


Рис. 2.9. Повреждения, вызванные внезапными выбросами пород (австралийская классификация) (окончание)

Объяснения к рис. 2.9:

а) малые повреждения; б) малые разрушения крепи; в) крупные разрушения крепи; г) тяжелые повреждения.

Е – тяжелые повреждения, выпадение более 100 т породы. Восстановление полости может оказаться невозможным (рис. 2.9 г).

Эта классификация использована при оценке тяжести последствий 207 сейсмических событий, происшедших в цинковой шахте Brunswick, Канада (табл. 2.6). Из таблицы следует, что:

- событие с уровнем магнитуды 0 редко является причиной повреждений;
- весьма большие события, находящиеся в пределах магнитуды от 2 до 3 по не всегда приводят к тяжелым последствиям категорий D и E;

Таблица 2.5 – Последствия внезапных выбросов породы в шахтах Южной Африки

Район горных работ	Магнитуда, М	Расстояние от центра события, м	Характер повреждения	Скорость перемещения пород, V, м/сек.
1	2	3	4	5
Klerksdorp	4,4	200	Забои в пределах 100 м от центра события полностью закрыты. Обширные повреждения стен подземных выработок.	в 200 м V = 2 м/сек. в 100 м V = 3,5 м/сек.

Продолжение таблицы 2.5

1	2	3	4	5
то же	5,0	до 750	Забои в пределах 250 м от центра события полностью закрыты. Забои уступов в пределах 750 м от центра испытали повреждения.	в 250 м $V = 2,6$ м/сек. в 750 м $V = 0,9$ м/сек.
то же	3,9	100	Обширные повреждения стен выработок.	в 100 м $V = 1,7$ м/сек.
Klerksdorp	2,7	± 100	Повреждения забоя на расстоянии 40 м, на расстоянии 90 м – падение кровли в выработках.	в 100 м $V = 0,4$ м/сек. в 50 м $V = 1$ м/сек.
то же	1,1	± 10	Обрушение забоев	в 10 м $V = 0,4$ м/сек.
Carletonville	4,0	± 100	Общее закрытие забоя на расстоянии 100 в каждую сторону от центра события. Примыкающие выработки не затронуты.	в 100 м $V = 1,7$ м/сек. в 50 м $V = 3,5$ м/сек.
East Rand	2,9	± 50	Забой полностью закрыт на расстоянии 30 м, обширные обрушения на следующих 10 м. Участковая выработка забоя обрушилась.	в 50 м $V = 0,26$ м/сек. в 15 м $V = 1,2$ м/сек.

Окончание таблицы 2.6

1	2	3	4	5
Central Rand	2,0	± 50	Главная транспортная выработка почти полностью закрыта на расстоянии 20 м, повреждения заметны на расстоянии до 90 м.	в 50 м $V = 0,26$ м/сек. в 10 м $V = 1,2$ м/сек.

- степень повреждений увеличивается с магнитудой события;

- имеется трехкратное уменьшение количества событий для каждого увеличения класса повреждений (для классов А-Д). Из общего числа событий 207, повреждения, по крайней мере, категории А были нанесены $(B + C + D + E) = 78$ объектам, категории В – $(C + D + E) = 31$ объекту, категории С – $(D + E) = 13$ объектам, категории Е – 9 (рис. 2.10).

Таблица 2.6 – Оценка тяжести последствий сейсмических событий в шахте Brunswick

Магнитуда	Тяжесть последствий					
	А	В	С	Д	Е	Всего
0,0	121	15	1	2	0	139
1,0	7	21	7	0	3	38
2,0	1	10	8	2	4	25
3,0	0	1	2	0	2	5
Всего	129	47	18	4	9	207

В Австралии в статистических целях, для использования в математических моделях и при оценке степени риска подземных операций разработаны оценки опасности сейсмических событий и их последствий (см. главу 4).

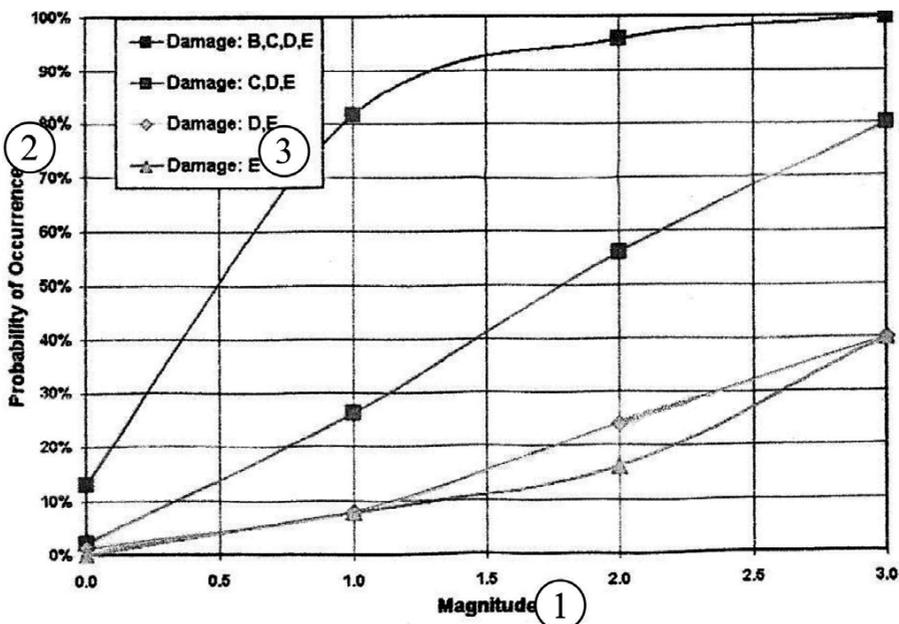


Рис. 2.10. Зависимость степени повреждения туннеля от магнитуды сейсмического события

1 – магнитуда; 2 – вероятность события; 3 – степень тяжести повреждений.

2.3 Механизм сейсмических событий и внезапных выбросов пород

2.3.1 Ранние теории природы внезапных выбросов пород

После возникновения первых выбросов на глубоких золотодобывающих шахтах в Южной Африке были предложены две теории, пытающиеся понять феномен явления. Первая объясняла его формированием «свода» куполообразной зоны трещиноватых пород вокруг полости, образующейся при горных работах, вторая – консольная – предполагала появление высоких напряжений в массиве, возникающих из-за разделения породных слоев при их оседании в результате экскавации. Теория свода считает, что после образования трещин над

добычным уступом при дальнейшей его отработке они приближаются друг к другу, разгружая уступ, тогда как оставленные между уступами опорные целики становятся все более напряженными. При извлечении целика объем свода увеличивается. Внезапный выброс пород является результатом разрыва большого объема массива между двумя сводами и высвобождения их аккумулированной энергии (рис. 2.11).

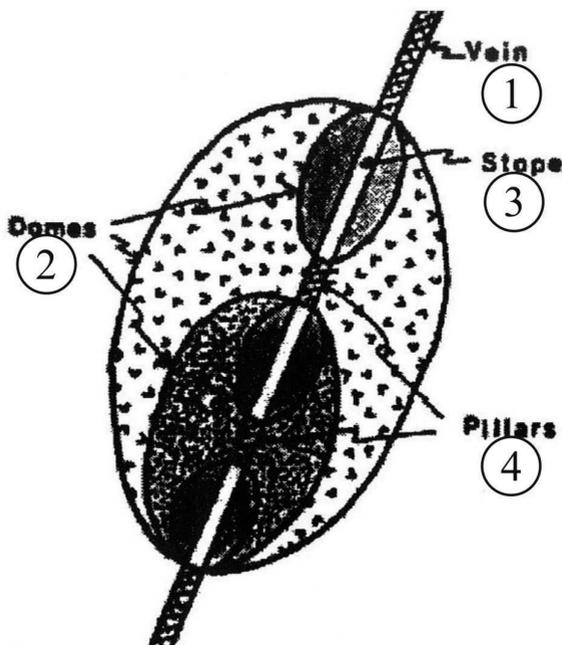


Рис. 2.11. Механизм сейсмических событий по теории свода
1 – жила; 2 – своды; 3 – уступ; 4 – целик.

Хотя формирование сводов, как части механизма внезапных выбросов, в дальнейшем подвергалось большим сомнениям, многие из характеристик, связанные с ними, продолжают использоваться в стратегии управления рисками.

Вторая ранняя теория – консольная – предполагала, что по мере развития добычных работ стойки крепи прогибаются под весом кровли. Висячий бок пород в уступе оседает, дей-

ствуя как балка или консоль. При дальнейшем оседании породные слои разделяются и начинают расщепляться, приводя к возникновению малых выбросов породы. Когда дальнейшее оседание продолжается, образовавшиеся породные «балки» срезаются на поддерживающихся концах, что приводит к внезапному выбросу (рис. 2.12).

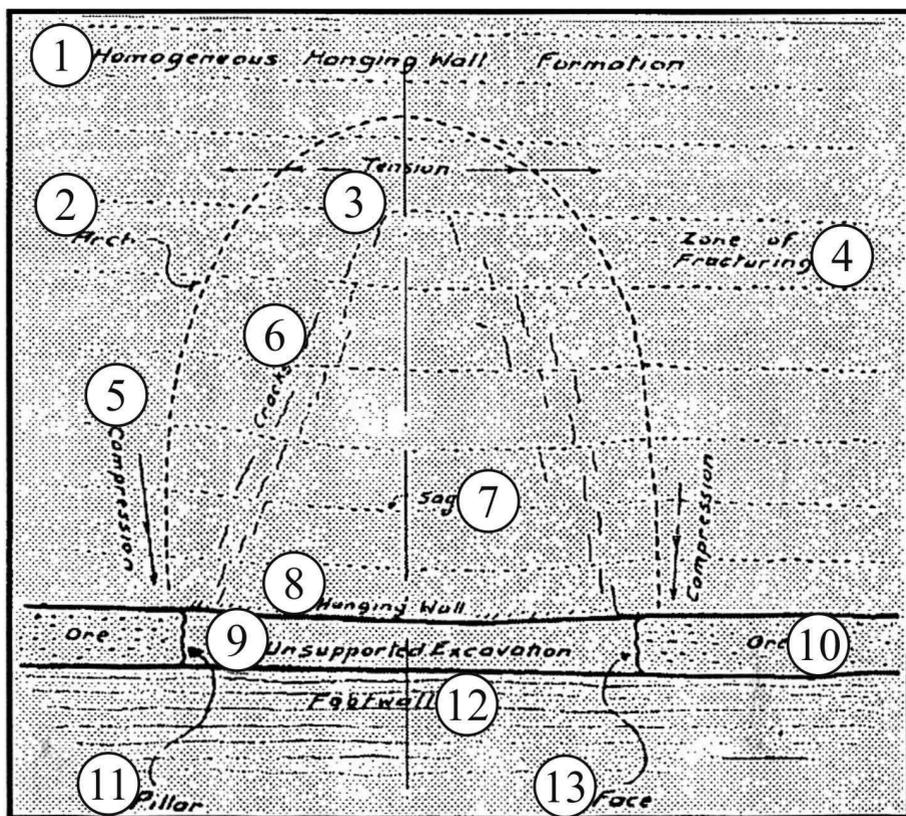


Рис. 2.12. Механизм сейсмических событий по консольной теории

1 – гомогенная формация висячего бока массива; 2 – арка; 3 – напряжения; 4 – зона трещинообразования; 5 – сжатие; 6 – трещины; 7 – оседание; 8 – висячая стена полости; 9 – unsupported excavation; 10 – руда; 11 – целик; 12 – лежащая стена полости; 13 – забой.

Эта теория была дискредитирована, когда использование сейсмометров показало, что большинство сейсмических событий происходит не в трещиноватых породах, а в твердом массиве перед подвигающимся забоем.

В ранних 50-х гг. в Южной Африке, а также в Канаде были организованы широкие исследования для качественного и количественного понимания проблемы. Их первой фазой были интенсивные лабораторные испытания поведения пород в условиях высоких напряжений, позволившие определить деформационные характеристики и механизм обрушения хрупких пород. Вторая фаза исследований включала сбор данных наблюдений, анализ которых показал их значительную варьированность:

- число и интенсивность выбросов увеличивается с глубиной;
- крепкие и хрупкие породы такие, как изверженные, более склонны к выбросам, чем слабые осадочные породы;
- выбросы чаще происходят в крутонаклонных месторождениях, чем в пологих;
- случаи выбросов увеличиваются с формированием целиков, оставляемых в выработанном пространстве.

В поздних 50-х гг., когда в исследованиях стала использоваться подземная сейсмическая сеть, локализация событий внезапных выбросов показала, что они происходят в твердых породах, что противоречило консольной теории. Возможно, наиболее впечатляющей особенностью исследований было то, что число наблюдаемых сейсмических событий существенно превышало число зарегистрированных выбросов. Это привело к выводу, что все внезапные выбросы пород являются сейсмическими событиями, но не все сейсмические события приводят к выбросу. Позднее было установлено, что наиболее важными механическими особенностями пород являются:

- упругость, т.е. свойство тел восстанавливать свою форму и объем после прекращения действия внешних сил;

- пластичность, т.е. свойство твердых тел необратимо деформироваться под действием механических нагрузок;
- вязкость, т.е. тягучесть, клейкость пород.

Эти особенности определяют отношения между нагрузкой, деформациями и временем. Было установлено, что когда нагрузка прикладывается к упругому материалу, он деформируется мгновенно и восстанавливается до первоначальной формы, когда нагрузка снимается. Трещиноватые породы, непосредственно прилегающие к подземной полости, ведут себя, как ее пластичное окружение.

Был сделан вывод, что только энергия, сохраняемая породными массами, служит источником ее высвобождения при внезапном выбросе. Позднее была разработана концепция энергетического баланса, описанная в главе 1.

2.3.2 Механизм возникновения внезапных выбросов пород

Горные работы увеличивают сейсмическую активность, ранжирующуюся от микросейсмических событий, выделяющих энергию 10^{-5} J до сотрясений, выделяющих 10^5 J. Однако, поскольку особое внимание уделяется событиям, причиняющим существенный ущерб подземному хозяйству, можно считать, что к ним относятся события, имеющие кинетическую энергию высвобождающуюся при горных работах не менее 10^4 J.

Теоретически в ходе увеличения подземных полостей малыми шагами (что в большинстве случаев является естественным для горных работ) высвобождаемая энергия постепенно удаляется с отбитой породой и поэтому не может быть прямой причиной сейсмической активности. В поиске ответа на вопрос, что может быть такой причиной, необходимо, в начале, объяснить, что в некоторых случаях даже малые шаги в подземной экскавации могут внезапно высвободить значительное количество энергии.

Для системы, находящейся в равновесии, ее потенциальная энергия должна иметь стационарное значение. Положение равенства может быть «стабильным» или «нестабильным» в зависимости от того, является ли это стационарное значение минимальным или максимальным. Для того, чтобы превратить систему, находящуюся в положении неустойчивого равновесия в систему устойчивого равновесия, требуется дополнительная внешняя работа, нарушающая систему неустойчивости. Обе такие системы показаны на рис. 2.13.

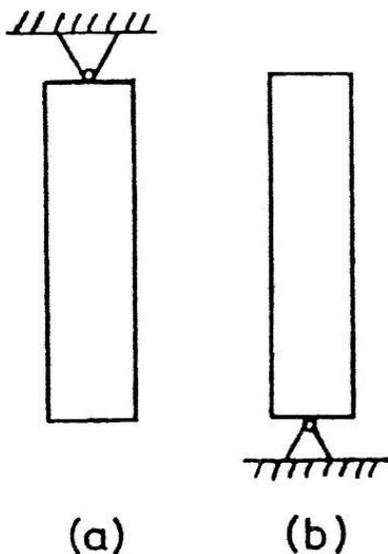


Рис. 2.13. Система, находящаяся в положении равновесия
а) стабильное равновесие;
б) неустойчивое равновесие.

Отсюда может быть сделан вывод, что кинетическая энергия, выделяемая сейсмическим событием – есть реализация энергии, «извлекаемой» из системы в ходе потери положения неустойчивого равновесия. Таким образом, для возникновения сейсмического события напряжения в породном массиве должны быть на грани неустойчивого равновесия. Причинами неустойчивости могут быть:

- неоднородности, содержащиеся в массиве;

- нестабильный материал, находящийся в определенных нагруженных условиях.

Как уже говорилось, к неоднородностям массива относятся сочленения породных блоков, нарушения, изверженные вторжения или слои, подвергаемые напряжениям гравитационным, тектоническим или вызванным горными работами. Геологические особенности не влияют на стабильность системы до тех пор, пока их противоположенные поверхности связаны силами сцепления или трения.

Состояние напряжений в некоторой точке массива, как результат горных работ, может достигнуть критического значения, преодолевающего трение или сцепление на поверхностях неоднородностей, находящихся до этого момента в очевидной нестабильности.

Простая механическая модель, показанная на рис. 2.14 демонстрирует принцип этого вида нестабильности. Представим блок пород, расположенный на неровной поверхности, на который действуют нормальная сила N ($N=gM$, где g - ускорение свободного падения; M - масса блока) и тангенциальная сила T . Предполагается, что последняя проявляет свое влияние через упругую пружину. Такая система будет находиться в стабильном равновесии, пока

$$T - \mu_s N > 0,$$

где μ_s - статический коэффициент трения.

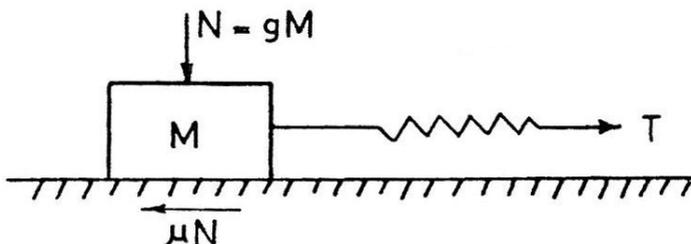


Рис. 2.14. Механическая модель скольжения по поверхности неоднородности

Таким образом, когда N действует на блок, сила T может постепенно увеличиваться без движения блока так долго, как остается справедливым это неравенство. Когда $T = \mu_s N$, система приходит в состояние неустойчивого равновесия и блок начинает движение либо при увеличении T , либо при уменьшении N . При движении блока начинает действовать динамический коэффициент трения μ_d и, как результат, сила $(\mu_s - \mu_d)N$ ускоряет блок, получающий кинетическую энергию в этом процессе.

В ходе экскавации создаются новые неоднородности в массиве, окружающем подземную полость. Пример этого иллюстрируется рис. 2.15, который показывает медленное растяжение цилиндрического стержня. Предположим, что, когда напряжение достигает значения прочности на растяжение σ , стержень растрескивается в каком-то поперечном сечении « mn ». Непосредственно до и сразу после этого разрушения напряжения, действующие на сечение « mn » равны соответственно σ и 0 . Это изменение напряжений может быть адекватно достигнуто внезапным приложением равномерно распределенного сжимающего усилия с магнитудой σ к обнажившейся поверхности сечения « mn ». Такое усилие, подобное ударному воздействию инициирует распространение волн сжатия в обеих частях стержня, создавая сейсмическое событие.

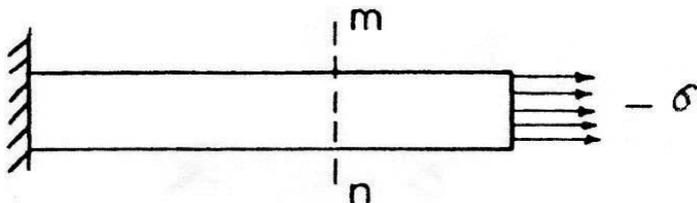


Рис. 2.15. Создание сейсмического события, как результата напряженного разрыва пород

Установив, что непосредственной причиной этого события является нестабильность породного массива, остается выяснить проблему идентификации источника кинетической

энергии, приданной частицам пород. Разрушение стержня на рис. 2.15 – хороший пример перехода энергии напряжений в кинетическую энергию. Как результат разрыва стержня, волны сжатия начинают распространяться вдоль его обеих частей со скоростью c . Поскольку эти волны нейтрализуют существующие напряжения растяжения, после истечения времени t части стержня с общей длиной $2ct$ становятся разгруженными. Остающаяся часть продолжает быть подверженной растягивающему напряжению σ .

Приведенные на рис. 2.14 и 2.15 примеры показывают, что обычно источник сейсмической энергии – энергия, хранящаяся в породах, которая в большинстве случаев возникает, благодаря силе тяжести и напряжениям, вызванным горными работами. Иногда, однако, важную роль играют также тектонические силы, и тогда их вклад в энергию напряжений становится преобладающим.

Сейсмическое событие случается только, если для этого существуют следующие необходимые условия:

- режим породных масс должен находиться на грани неустойчивого равновесия из-за:

- а) наличия соответственно нагруженных геологических слабых мест таких, как сочленения, нарушения, изверженные вторжения или плоскости породных слоев;

- б) изменяющихся напряжений, приводящих часть породного массива к внезапному разрушению;

- в) наличия поддерживающей системы, например, опорного целика, которая приближается к состоянию неизбежного неустойчивого обрушения.

- индуцированные напряжения, воздействующие на регион, имеют магнитуду достаточно большую, чтобы вызвать неустойчивость;

- имеется значительное количество энергии, которое хранится в породах вокруг зоны неустойчивости, достаточное, чтобы создать источник кинетической (сейсмической) энергии. Происхождение этой хранимой энергии - гравитаци-

онные или тектонические силы, а также напряжения, индуцированные горными работами.

Исследования доказали, что большинство сейсмических событий ограничено окрестностями текущей горной деятельности и, следовательно, имеется причинно-следственная связь между горными работами и сейсмоопасностью, особенно, в высоко напряженных зонах. Однако, не существует геометрии или плана последовательности горных работ, которые бы с неизбежностью вели к возникновению сейсмического события. В лучшем случае, его возможность выше в одной ситуации, чем в другой. Таким образом, предсказуемость сейсмичности имеет вероятностный характер более, чем детерминистский.

Возникновение нестабильного равновесия в породах обычно связано с наличием существующих трещин. Происхождение, размер, расположение и распределение этих трещин варьируется. Такая варьированность определяет статистический (вероятностный) элемент сейсмичности и означает, что число трещин на единицу объема, вызывающих нестабильность, может расти с увеличением амплитуды сотрясений массива горными работами.

Отсюда следует, что ожидаемая частота сейсмических событий возрастает, если:

- индуцированные сотрясения, воздействующие на данный объем пород, увеличивается;
- объем пород, подверженный данному уровню сотрясений, становится больше.

Сотрясения, вызванные развитием горных работ, преимущественно прямо пропорциональным величине напряжений, действующих на обнажающуюся поверхность забоя, и обратно пропорциональны расстоянию от последнего до сотрясаемого пункта массива, находящегося в неустойчивом равновесии. Это означает, что вероятность встречи сейсмического события становится больше, если разрабатывается высоко напряженная часть месторождения и пункты неустойчи-

вого равновесия массива находятся в окрестностях действующих горных работ.

При подвигании забоя напряжения вокруг него изменяются сильнее, чем в пространстве, противоположном забою, поскольку поле напряжений перемещается вместе с разрабатываемым забоем с каждым шагом экскавации. При этом регулярно обнажается свежий объем пород, из-за чего растет вероятность встречи забоем ослабленных зон или неоднородностей, которые становятся центрами сейсмических событий.

Горными работами инициируется расширение старых и формирование новых трещин, которые обычно распространяются со временем после взрывного цикла. Возрастающая трещиноватость пород и концентрация напряжений в действующем забое приводят к отторжению породных фрагментов и прогибу образующихся плит на поверхности экскавации. При этом высвобождается как энергия напряжений, хранящаяся в массиве, так и гравитационная потенциальная энергия (через оседание пород над полостью). Перераспределение напряжений и высвобождение их энергии является причиной разрушения целиков, оставленных в выработанном пространстве, что может не только воздействовать на окружающий массив, но также вызывать ударную волну, достигающую других критически нагруженных целиков (рис. 2.16).

При напряженном выбросе, который в общих чертах описан выше, обычно наблюдаются следующие явления:

- внезапное обширное трещинообразование затронутых пород, разделяющее их на малые фрагменты;

- громкий мгновенный звук похожий на взрыв заряда. Близким наблюдателям кажется, что звук выделяется непосредственно в месте выброса;

- интенсивный выброс породных обломков в подземную полость, происходящий до какой-либо реакции персонала. За начальным выбросом обломков следует короткий период, в котором фрагменты пород продолжают выпадать. Шахтеры, вовлеченные в эти события, обычно не затрагиваются непо-

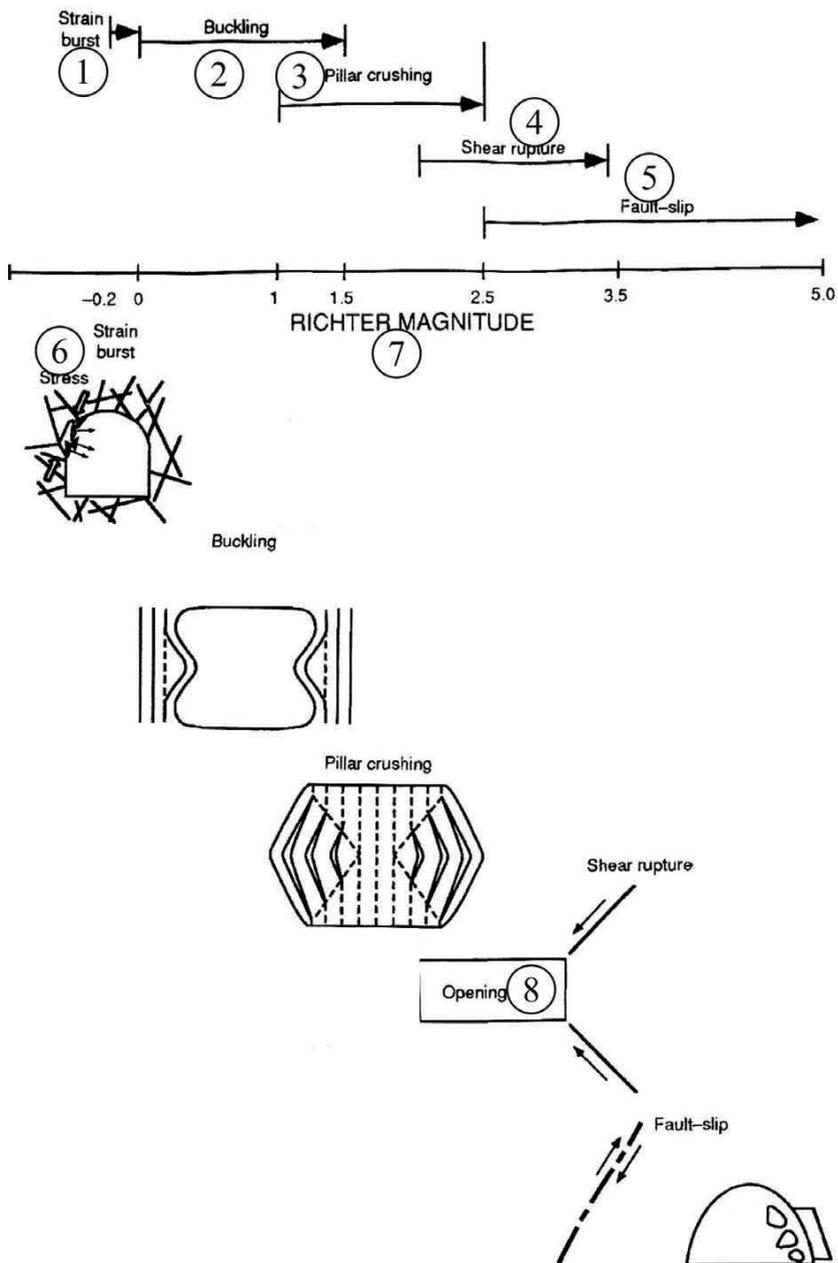


Рис. 2.16. Упрощенная схема взаимоотношений между магнитудой и механизмом выброса

Объяснения к рис. 2.16:

1 – напряженный выброс; 2 – прогиб; 3 – разрушение целика; 4 – разрывное нарушение; 5 – скольжение по нарушению; 6 – напряжение; 7 – магнитуда; 8 – полость.

средственно выбросом, но могут быть засыпаны потоком породных обломков и рискуют получить ушибы. Велик также риск их удушья от сдавливания грудной клетки;

- мгновенное заполнение воздуха густым облаком пыли.

Крупный напряженный выброс может создать сгущение пыли, создающее впечатление, что шахтерские лампы вдруг погасли;

- волна повышенного давления воздуха («воздушный взрыв»), которая проходит через всю шахту. За начальной волной следует продолжительный ветер, вызванный стесненным пространством, если объем полости из-за выброса существенно не увеличивается;

- образование в поверхности полости впадины (воронки), дно которой формируется трещиной, нарушением или плоскостью напластования. В общем случае в выработке размером 3х3 м образуется впадина размером от 3 до 200см.

При выбросе в целике происходит нестабильное разрушение последнего, которое, подобно напряженному выбросу, вызывается комбинацией трещинообразования, скольжения и прогиба окружающих пород. Эти разрушающие элементы обычно распространяются в породный массив глубже, чем в случае напряженных выбросов и часто захватывают основание целика, который теряет несущую способность, высвобождая значительное количество энергии. Несмотря на сходство с другими видами сейсмической активности, выброс в целике существенно отличается прямой зависимостью от геометрии, последовательности и методов работ.

Примером выбросов в целиках служат шахты района Coeur d'Alene, где оставляемые целики постепенно обрабатываются. Внезапные выбросы в них вызывают повреждения и

закрытие прилегающей полости, что происходит, когда целики уменьшаются при отработке до 18-20 м, иногда до 12-15 м.

Потенциал выбросов в целиках определяется геометрией горных работ (и, в частности, собственно целиков), методами и последовательностью добычных работ, практикой закладки выработанного пространства, темпами добычи. Опорные целики вообще могут быть устранены применением, например, длиннозабойной системы разработки.

Оба описанных вида выбросов – напряженные и в целиках вызываются высокими напряжениями, которые локально концентрируются и переориентируются вокруг подземных полостей. Эти выбросы идентичны по разрушающему механизму и различаются преимущественно масштабами, горной геометрией и ее воздействием на способность породного окружения распределить энергию и окончательно направить выброс.

Разрушающий механизм выброса включает в себя два отдельных явления:

- в вовлеченных в выброс породах развивается зона трещин, параллельных поверхности полости. Если эта трещиноватость не экстремальна и разделенные ею породные блоки остаются на месте, крепь полости не испытывает значительных проблем. Однако, если условия таковы, что трещины продолжают развиваться, они разделяют породную стену полости на плиты (слои), примерно параллельные контуру полости;

- породные слои, в конечном счете, деформируются прогибом в полость, который, в свою очередь, приводит к трещинообразованию хрупких пород. Формируемые при этом плоские породные плиты не могут далее выдерживать нагрузку и становятся нестабильными. Этот момент происходит при определенном соотношении толщины и длины плиты для разной нагрузки и качества материала. Если постепенный прогиб может причинить только незначительный ущерб, то мгновенный прогиб часто имеет форму внезапного выброса.

Упругая энергия, существующая внутри индивидуальных плит при деформации прогиба рассеивается, как недостаточная, чтобы вызвать интенсивное разрушение плиты. При возникновении внезапного выброса такая энергия передается прогнутым плитам от окружающего породного массива.

Модели такого поведения пород иллюстрируются рис. 2.17, где затемненные участки показывают источник упругой энергии выброса. При развитии отторжения единственной нестабильной плиты (рис. 2.17 А) точечное присоединение ее концов к примыкающей жесткой стене ограничивает способность окружающих пород передать упругую энергию. С другой стороны, выброс в целике приводит к его полному разрушению. Эти выбросы, очевидно, развиваются от формирования множества нестабильных плит по всему сечению целика до их одновременного прогиба (рис. 2.17 В). Здесь сохраняемая упругая энергия большого объема окружающих пород реализуется началом прогиба, а затем передается разрушающемуся целику. Экстенсивное увеличение энергии напряженного выброса, включающее одновременное развитие множества плит и их прогиб, представляет собой случай, когда сохраняемая упругая энергия даже среднего объема окружающих породных масс становится достаточной, чтобы привести к выбросу (рис. 2.17 С).

При скольжении нарушения возникновение выбросов определяется механизмом «прилипания-проскальзывания» (stick-slip) пород в неоднородностях массива. Эти выбросы менее вероятны во время взрывных работ, но более часто происходят во время рабочей смены. Скольжение пород может также случиться, как часть выброса в целике или в поверхности полости в ходе рабочих операций.

Выше отмечалось, что скольжение происходит, когда отношение напряжения среза вдоль плоскости напряжения к нормальному напряжению достигнет критического значения. В большинстве случаев горные работы вызывают скольжение снижением нормального напряжения, хотя может также про-

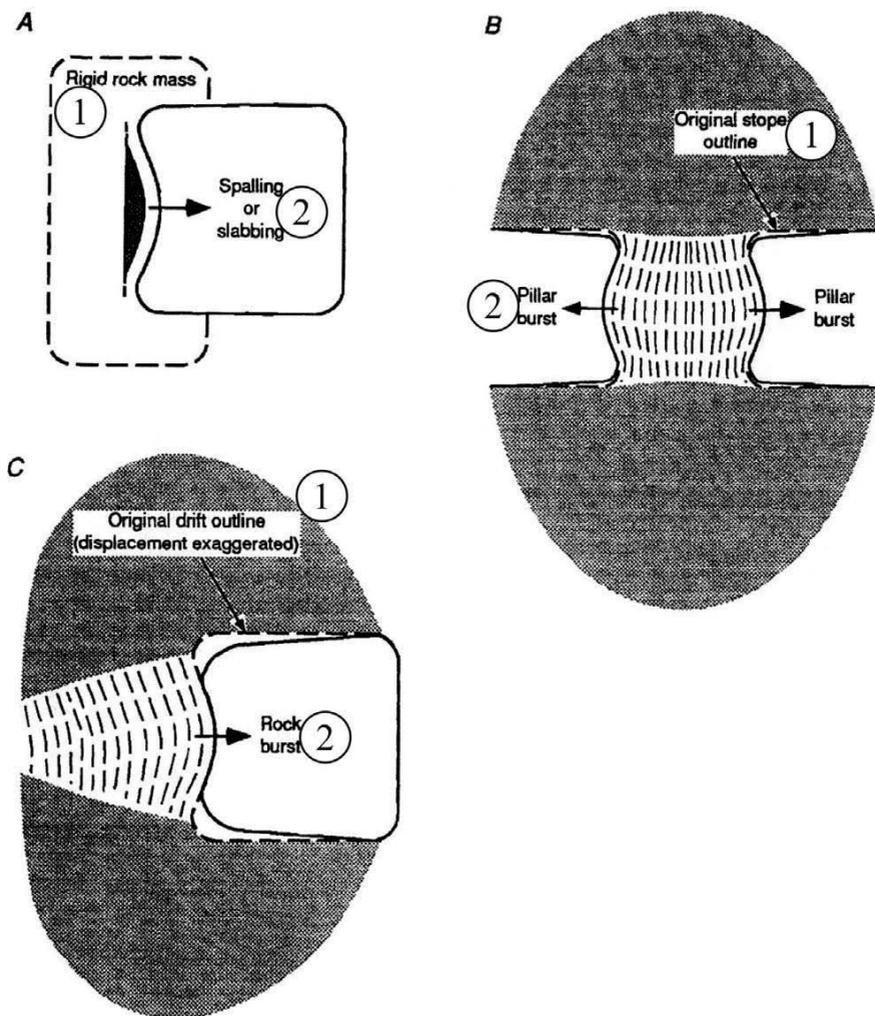


Рис. 2.17. Механизм разрушения при прогибе пород

А) деформация единственной плиты.

1 – жесткий породный массив; 2 – расслоение, образование плиты.

В) разрушение целика.

1 – начальный контур уступа; 2 – выброс целика.

С) расширенное разрушение при напряженном выбросе.

1 – начальный контур штрека; 2 – внезапный выброс пород.

изойти некоторая локальная интенсификация среза. Изменения в напряжениях вдоль нарушения часто связаны с деформационными процессами, вызванными работой шахты. Эти зависящие от времени процессы могут действовать на протяжении длительных периодов безотносительно к продолжающейся добычной деятельности. Например, значительные сейсмические события (почти определенно вызванные скольжением) происходили в течение нескольких месяцев после прекращения горных работ на закрытой шахте Galena района Coler d'Alene. Наибольшая часть этих событий с магнитудой 3,0 случилась почти через 300 дней после того, как работы были прекращены.

Механизм прилипания-проскальзывания может вызвать события со значительной сейсмической энергией. Например, было доказано, что все большие сейсмические события с магнитудой 2.4-4,5 на шахте Lucky Friday, происходившие в течение 6 лет были связаны с механизмом скольжения. Более того, эти события вызывались повторяющимся движением массива вдоль пяти отдельных структур. Вообще интенсивные повреждения часто наблюдались в местах, где плоскости скольжения пересекали подземные полости или выработанное пространство. Ущерб от сотрясений обнаруживался возле мест событий, где породы плохо крепились, были сильно трещиноватыми и необычно слабыми.

Далее в качестве примера анализа причин и механизма возникновения внезапных выбросов пород рассмотрен опыт некоторых шахт Южной Африки.

2.4 Региональные аспекты сейсмической активности, индуцированной горными работами

Возникновение внезапных выбросов пород, связанных с эмиссией сейсмической энергии – одна из наиболее серьезных проблем при извлечении золотоносной руды района Witwatersrand, Южная Африка. Эти сейсмические события,

вызванные горными работами, повреждают подземные полости (а иногда, даже структуры на поверхности земли), являются причиной несчастных случаев и потери добычи. Природа и опасность выбросов, а следовательно, управление ими в разных добывающих районах могут различаться и поэтому потребовать конкретной стратегии.

Размеры бассейна Witwatersrand составляют 320 x 160км, вдоль его границы расположена интенсивно нарушенная зона, параллельная простиранию месторождения. Рудное тело во многих местах смещено большим числом относительно небольших продольных и поперечных нарушений, а также изверженных вторжений.

Горнодобывающие операции ведутся на золотоносных полях Evander у восточной границы бассейна, East Rand, Central Rand и Far West Rand – у северной границы, на полях Klerksdorp и Orange Free State – у западной границы (рис. 2.18). Глубина работ, в основном, колеблется от 1600 до 2000м, однако в отдельных местах достигает 3000м.

Кроме глубины, золотоносные поля района различаются также сейсмической энергией. Так энергия, наблюдавшаяся на поле Far West Rand была более, чем вдвое выше отмеченной на соседних полях Klerksdorp и Orange Free State. Следует также отметить, что уровень сейсмичности самого неглубокого поля Evander составляет всего 1.5% от уровня поля Far West Rand. Однако, прямое сравнение сейсмической активности различных районов ошибочно, поскольку у них имеются значительные различия как в объеме разрабатываемых рудных тел, так и в средней глубине разработки.

Параметры сейсмической и потенциальной энергии районов, а также коэффициент их сейсмической характеристики даются в табл. 2.7.

Очень высокий уровень сейсмичности района Central Rand может быть объяснен большой глубиной разработки и тем, что к моменту оценки все шахты района закончили ак-

тивную жизнь и действия по добыче сводились только к извлечению оставшихся целиков.

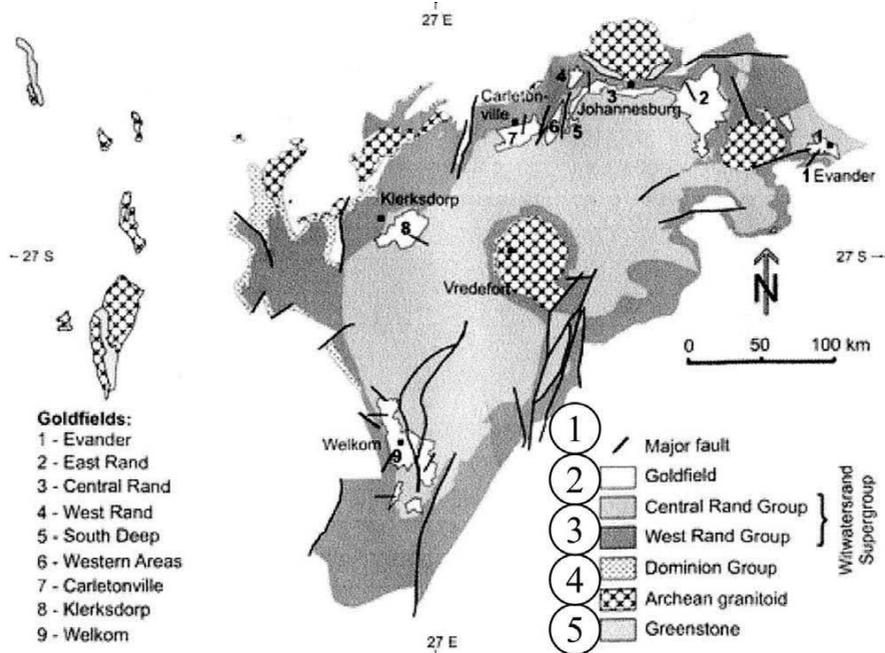


Рис. 2.18. План района Witwatersrand, Южная Африка

1 – главное нарушение; 2 – золотоносное поле; 3 – группы шахт;
 4 – архейский гранитоид; 5 – нефрит.

Таблица 2.7 – Сейсмическая характеристика главных золотоносных районов

Район	Сейсмическая энергия (SE), 10^6 MJ	Потенциальная энергия (PEC), 10^9 MJ	Сейсмическая характеристика (SE/PEC) 100
Evander	0,4	0,55	0,07
East Rand	4,1	0,8	0,51
Central Rand	2,7	0,2	1,35
Far West Rand	27,8	3,3	0,84
Klerksdorp	12,8	2,6	0,49
Orange Free State	11,8	3,65	0,32

Еще одним распространенным показателем сейсмичности месторождения служит темп высвобождения энергии MJ/m^2 (energy release rate - ERR), определяющий количество энергии, приходящейся на 1 m^2 отработанной площади рудного тела (табл. 2.8).

Таблица 2.8 – Распределение добычных уступов в соответствии с темпом высвобождения энергии

Район	Процент уступов с различным темпом высвобождения энергии, MJ/m^2					Средневзвешенный темп, MJ/m^2	Темп отработки уступов, $10^6 \text{ m}^2/\text{год}$
	0-20	20-40	40-60	60-80	> 80		
Evander	80	16	4	-	-	14,8	1,6
Central Rand	15	35	40	7,5	2,5	39,75	2,7
West и Far West Rand	34	33	23	7,5	2,5	32,5	5,0
Klerksdorp	65	23	9	3	-	20	3,6
Orange Free State	57	33	9	1	-	20,8	5,5

Рис. 2.19а иллюстрирует для еще одного поля – Vlyvooguitzicht влияние на сейсмичность нарушений и изверженных вторжений. Здесь по контуру выработанного пространства показаны изолинии числа сейсмических событий с магнитудой $M_L > 1,5$ на единицу площади, разделенного на темп высвобождения энергии, чтобы компенсировать варьированность горной геометрии. На этом же рисунке показаны интенсивные геологические неоднородности, где уровень сейсмической активности в несколько раз превышает районы с однородным строением породного массива. Отсюда следует, что геологические факторы являются даже более важными, чем геометрические, в управлении темпом высвобождения

сейсмической энергии, по крайней мере для рассматриваемого района.

а)

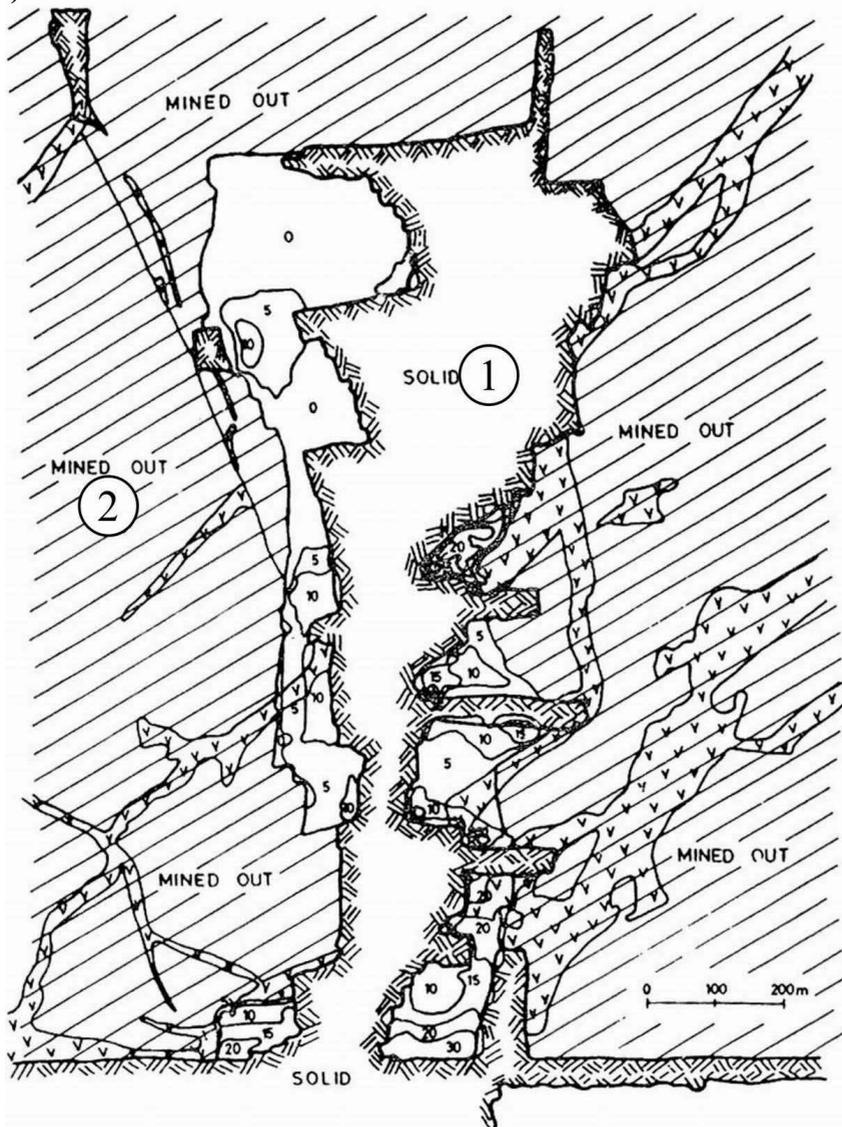


Рис. 2.19. Влияние неоднородностей породного массива на сейсмичность

б)

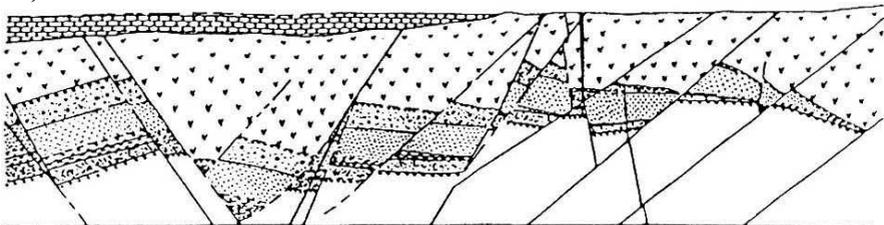


Рис. 2.19. Влияние неоднородностей породного массива на сейсмичность (окончание)

а) план горных работ шахты Blyvooruitzich.

б) разрез по полю шахты Klerksdorp.

1 – целик; 2 – выработанное пространство.

Характерным примером геологической нарушенности служит поле Klerksdorp (рис. 2.19б). Здесь нарушения со сбросами от 10 до 20 м являются обычными, тогда как имеются также нарушения с амплитудой, превышающей 150м. В результате такой нарушенности глубина горных работ варьируется от нескольких сотен до более, чем 3000м.

Изучение сейсмических событий на поле Klerksdorp показало наличие их следующих категорий:

- события в целиках. От площади целика зависит магнитуда события, изменяющаяся в пределах 4,2-4,5 по Рихтеру;
- события в уступах. Эти события случаются вблизи добычных работ и находятся в пределах низких значений магнитуд;

- события в нарушениях. Эти наиболее повреждающие сейсмические события имеют прямую зависимость между размером смещения в нарушении и магнитудой. Вероятность события повышается, когда полости нарушения литологически различны;

- события, связанные с изверженными вторжениями. Исследования, проводившиеся в течение почти 10 лет, выяснили, что примерно 5% от 2300 сейсмических событий расположены в пределах 100 м, 41% - в пределах 60 м и 30% - в

пределах 30 м от ближайшего изверженного вторжения. Эти события имеют меньшую магнитуду, чем в целиках и нарушениях (редко выше 4,0). Было установлено, что более крепкие вторжения имеют тенденцию к большей сейсмической активности.

Повреждения, связанные с событиями в нарушениях, обычно тяжелее в районе их пересечений с вскрывающими выработками (туннельного типа). Уязвимы к таким событиям также штреки, подготавливающие добычные уступы и расположенные вблизи полостей нарушений. Повреждения в уступах, в общем, менее тяжелы, но могут вызвать обрушения пород на большой площади.

Повреждения в туннеле в месте его пересечения с нарушением показаны на рис. 2.20. Туннель проходил в лежащем боку месторождения и, хотя он был серьезно поврежден, крепь выполнила свою функцию и проход через туннель не был потерян.

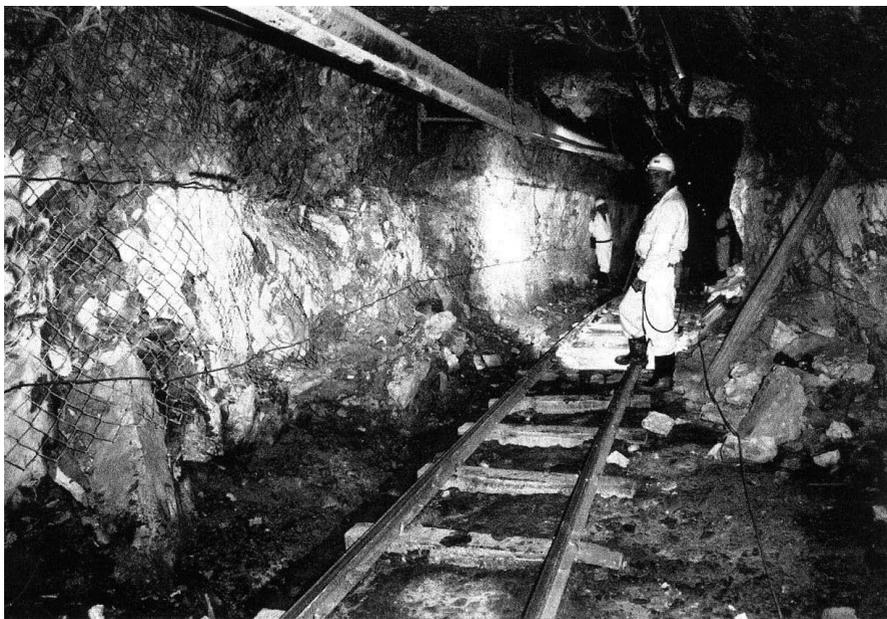


Рис. 2.20. Повреждения в туннеле, связанные с пересечением нарушения

Рис. 2.21 показывает детали повреждений внезапными выбросами добычных уступов.

а)



Рис. 2.21. Детали повреждений добычных уступов внезапными выбросами пород

б)



Рис. 2.21. Детали повреждений добычных уступов внезапными выбросами пород (окончание)

а) вход стойки крепи в кварцит почвы с осевой прочностью на сжатие 180 МПа; б) разрушения в уступе на глубине 2200 м после выброса с $M_L = 4,0$.

Для шахт Южной Африки определялось также влияние региональной системы сочленений блоков породного массива на сейсмичность длинных забоев, которое показано на рис. 2.22. Левая сторона рисунка иллюстрирует распределение сейсмических событий за двухлетний период вокруг подвигающегося на восток длинного забоя в рудном теле Western Deep Levels, тогда как правая сторона – забоя, подвигающегося на запад. Направления забоя и преобладающих сочленений в этих случаях соответственно примерно перпендикулярны и параллельны. Рисунок показывает существенную зависимость сейсмического поведения пород от направления движения забоев.

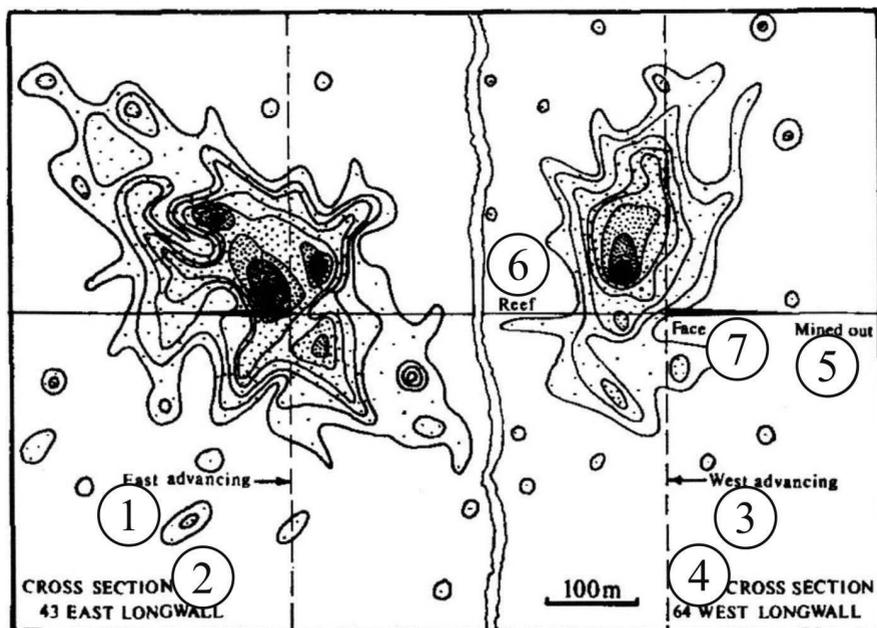


Рис. 2.22. Влияние региональной системы сочленений породного массива на сейсмичность

- 1 – подвигание на восток; 2 – сечение восточного длинного забоя;
 3 – подвигание на запад; 4 – сечение западного длинного забоя;
 5 – выработанное пространство; 6 – рудное тело; 7 – забой.

Исследования показали, что максимальная магнитуда сейсмического события, происходящего в нарушении, зависит от его сбросового смещения и определяется выражением

$$M_{max} = 0,32 + 1,88 \log D,$$

где M_{max} – максимальная магнитуда по Рихтеру;
 D – сбросовое смещение, м.

Как уже говорилось, был предложен критерий для описания относительной сейсмоопасности добычи руды – темп высвобождения энергии на единицу отработанной площади ERR. На рис. 2.23 и 2.24 показана зависимость от ERR по-

следствий внезапных выбросов – повреждений и потери добычи (рабочих смен) на месторождениях Ventersdorp Contract Reef и Carbon Leader Reef. Эти зависимости показаны для уступа шириной 35 м. Одна смена добывает в уступе около 70т руды. Среднее число потерянных смен из-за повреждений, вызванных выбросом, равно 4,5, независимо от уровня ERR (на рисунке обозначение CA = 1 м²).

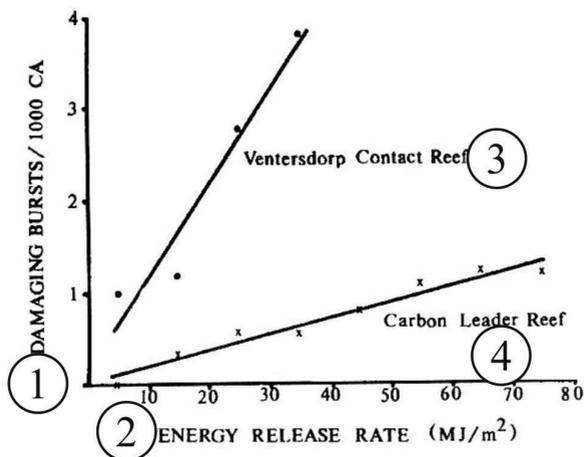


Рис. 2.23. Зависимость числа внезапных выбросов пород, останавливающих добычные работы, от уровня высвобождения энергии

1 – повреждающие выбросы (на 1000 м² отработанной площади);
 2 – уровень высвобождения энергии; 3 – месторождение Ventersdorp Contract Reef; 4 – месторождение Carbon Leader Reef.

Критерий ERR был применен также для условий месторождения Western Deep Levels, где была сделана попытка количественно оценить важность влияния нарушений и изверженных вторжений на темп высвобождения сейсмической энергии и, следовательно, на опасность возникновения сейсмического события. Оказалось, что наличие неоднородности, пересекающей добычной уступ, или находящейся от него на расстоянии примерно равном ширине уступа (35-40 м), до-

бавляет около 30 MJ/m² к среднему уровню ERR 40 MJ/m². Соответственно увеличивается потеря добычи из-за внезапных выбросов или падения пород.

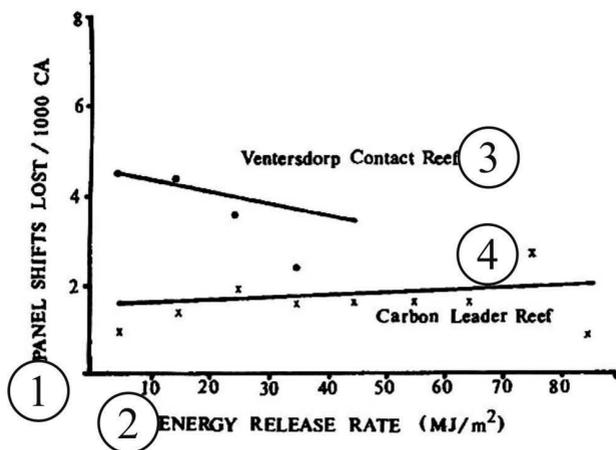


Рис. 2.24. Зависимость потери рабочих смен при внезапных выбросах пород от уровня высвобождения энергии
 1 – потеря рабочих смен (на 1000 м² отработанной площади);
 остальные обозначения аналогичны рис. 2.23.

Поскольку рудное тело Western Deep Levels имеет примерно 195 уступов без нарушений со средним уровнем ERR = 40 MJ/m² и 45 уступов, пересекаемых нарушениями или вторжениями, со средним уровнем ERR = 40 + 30 = 70, то вероятность опасности выбросов или падений пород возрастает на

$$\frac{45 \cdot (40 + 30)}{195 \cdot 40 + 45 \cdot (40 + 30)} = 30\%$$

Пересечения неоднородностей действуют, как концентраторы напряжений, генерируя скопление малых сейсмических событий. Поэтому приближение забоев к главным нарушениям должно планироваться заранее, чтобы минимизировать риск внезапных выбросов.

С расширением и увеличением глубины горных работ число подземных сотрясений в районе Witwatersrand быстро росло с 7 в 1980 г. до 233 десятилетием позднее. Из табл. 2.9 видно, что хотя общее число смертельных случаев на подземных работах за 50-летний период анализа постепенно уменьшилось, тот же показатель для внезапных выбросов пород увеличился.

Таблица 2.9 – Смертельные случаи на подземных работах

Средняя годовая оценка смертельных случаев			
десятилетие	все причины на 1000 работаю- щих	выбросы и падения пород	
		на 1000 работающих	%
1926-35	2,36	0,93	39,5
1936-45	1,68	0,74	44,1
1946-55	1,55	0,71	45,9
1956-65	1,44	0,72	50,1
1966-75	1,31	0,73	55,7

Анализ собранных в районе Witwatersrand данных о внезапных выбросах пород показал значение следующих основных факторов:

- размер экскавации: число случаев внезапных выбросов увеличивается, когда пролет выработанного пространства достигает 180 м. При дальнейшем его увеличении частота случаев уменьшается с 0,4 до 0,3 на 1000 м² выработанного пространства при пролете примерно до 270 м. Затем размер выработанного пространства на частоту выбросов не влияет;
- размер опорного целика: число случаев выбросов увеличивается с уменьшением размера целика, пока его площадь не достигает размера 150 м², затем число выбросов уменьшается;
- глубина от поверхности: найдена существенная позитивная линейная корреляция между случаями выбросов и глубиной работ;

- нарушения и изверженные вторжения: число внезапных выбросов в уступах, расположенных в зонах нарушений и вторжений значительно больше чем, в тех, которые удалены от этих зон.

2.5 Пример внезапного выброса пород в выработке туннельного типа

Примером напряженного выброса пород в выработке туннельного типа может быть событие, случившееся 11 ноября 1999 г. после обычного продуктивного взрыва в ходе экскавации главного транспортного квершлага (туннеля) шахты Moab Khotsong, Южная Африка, расположенного на глубине 2800 м (горизонт 95L) (рис. 2.25). Здесь после взрывных работ образовалась полость выброса длиной 16м. Туннель, который проходил по твердому кварциту, был частично заполнен фрагментами пород из этой полости. Признаки геологических разрывов в кровле или стенах полости не были обнаружены.

Туннель был частью комплекса выработок, вскрывающих глубокую часть рудного тела Vaal Reef, имел арочную форму кровли и размеры сечения 4,5х4,5 м. Экскавация выполнялась буровзрывным способом с подвиганием за цикл 3м. Туннель крепился тампонируемыми арматурными стержнями и набрызгбетоном. Напряжения массива оказались достаточными, чтобы развиться трещиноватости в породах вокруг и впереди подвигающегося забоя. Во время предшествующих работ сейсмические явления не наблюдались, однако, после последнего взрыва бригада услышала совершенно необычный сильный шум короткой продолжительности и увидела в забое неожиданную картину. Обычно раздробленная взрывом порода состоит из фрагментов варьируемых размеров, но примерно одинаковой формы, лежащих напротив взорванного забоя под углом естественного откоса компактной грудой диаметром несколько метров. Сейчас вместо этого породные фрагменты были примерно одинаковых размеров,

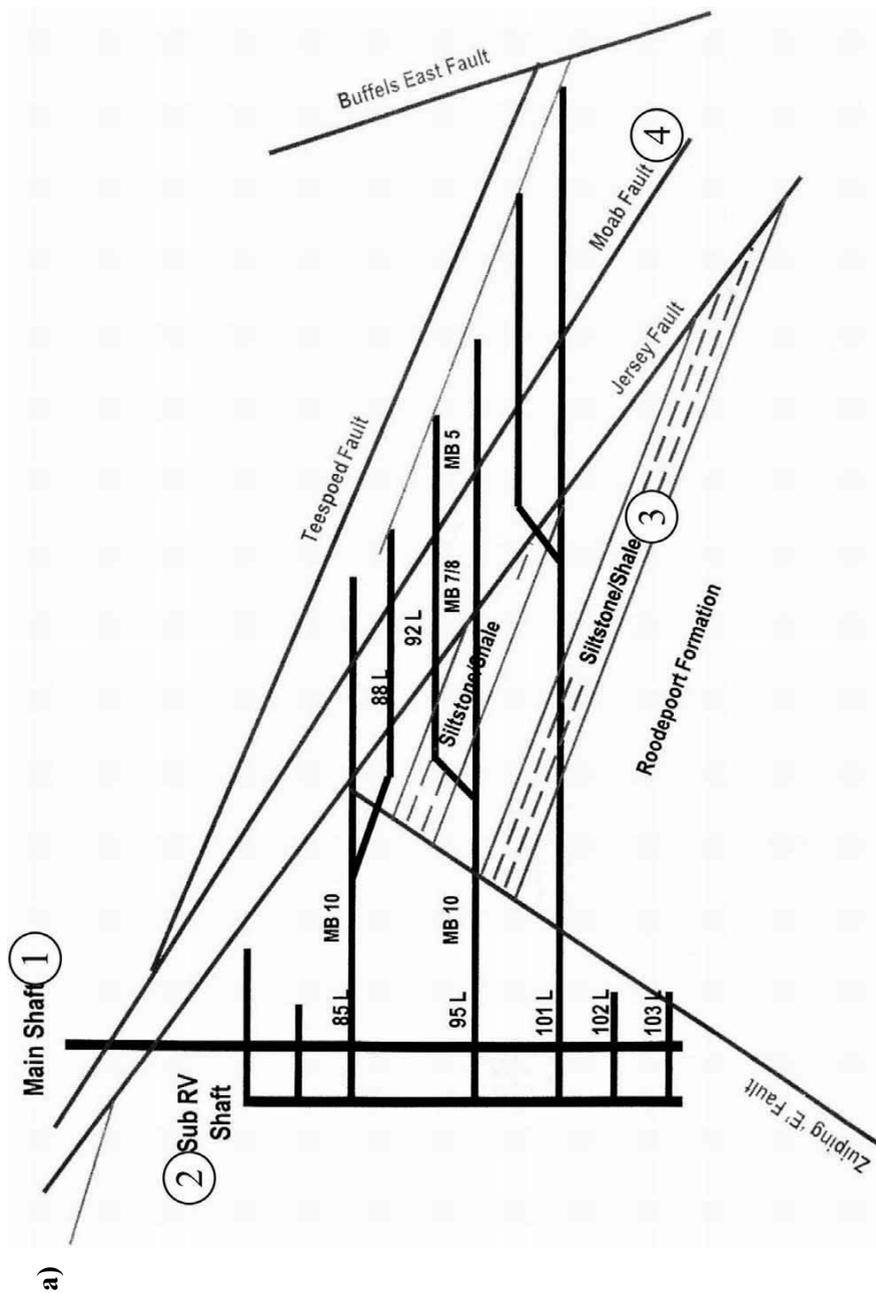
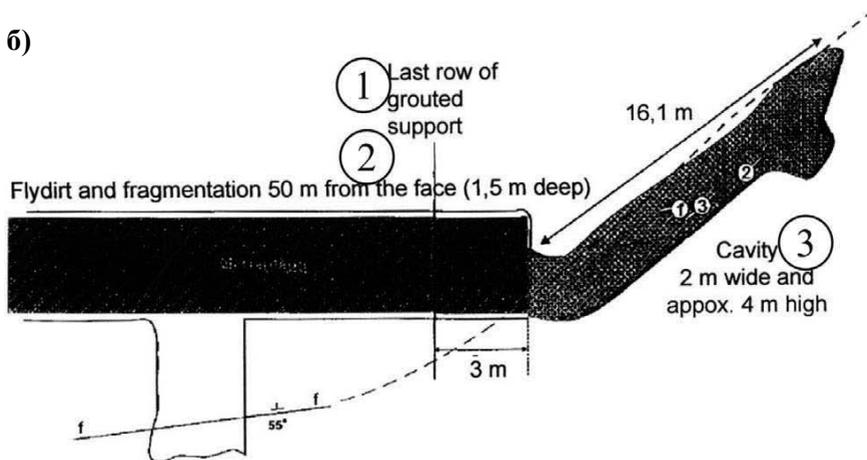


Рис. 2.25. Образование полости при внезапном выбросе пород в туннеле шахты Moab Khotsong

б)



в)



г)

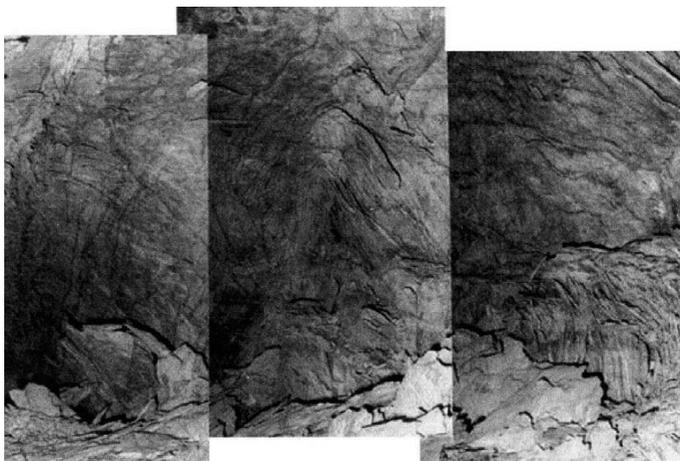


Рис. 2.25. Образование полости при внезапном выбросе пород в туннеле шахты Moab Khotsong (окончание)

Объяснения к рис. 2.25:

а) схема вскрытия шахты.

1 – главный ствол; 2 – слепой ствол; 3 – алевролиты; 4 – нарушения.

б) план туннеля и полости.

1 – последний ряд затампированной крепи; 2 – участок фрагментации и разлета обломков; 3 – полость шириной 2 м и высотой примерно 4 м.

в) полость, образовавшаяся при внезапном выбросе пород;

г) развертка изображения полости выброса.

имели плоскую дугообразную форму диаметром 150-300 мм и толщиной от 1/5 до 1/10 диаметра. Верхушка их груды, заполнившей туннель на длине 53 м от забоя, была почти горизонтальной – плоской по ширине туннеля. Было также видно, что перед забоем туннеля образовалась полость с кровлей крутой арочной формы, простиравшаяся на 16 м под углом примерно 40° к направлению туннеля (рис. 2.25).

Внешний вид полости и наличие интенсивной системы мелких плит вдоль ее стен видны на рисунке. Острогранная пластинчатая форма отторгнутых фрагментов предполагала, что сильный, вызванный высоким уровнем ERR выброс, произошел от находившейся в начальной стадии нестабильности зоны аномальной концентрации напряжений.

Уровень поверхности груды обломков и ее распространение по туннелю говорили о выделении газа, находившегося под высоким давлением. Благодаря форме обломков, они легко выносились волной газа. Образцы исходящего из забоя воздуха показали высокую концентрацию сероводорода, но признаки присутствия или взрыва метана не были обнаружены.

Предполагаемый механизм внезапного выброса пород объяснялся следующими факторами:

- первичная тектоническая активность, вызвала появление геологических неоднородностей, таких, как нарушения или срезанные зоны (не обязательно отчетливые и видимые) с возможными аномально высокими локализованными напря-

жениями. Это показывает южная стена полости относительно более плоская, чем северная, что объясняется возможным наличием в ней плоскости нарушения;

- напряжения массива на разных сторонах геологической неоднородности были различны и поэтому они, очевидно, оказались выше на стороне, где образовалась полость выброса;

- характеристики материала на разных сторонах неоднородности также могли быть различны, например, более хрупкие, слабые и пористые – на стороне образования полости выброса;

- туннелем пересекалось нарушение и перед забоем образовалась обширная трещиноватая зона, сформировавшая тонкие плиты, что обычно наблюдается на стенах туннелей, расположенных на большой глубине;

- тонкие плиты были изогнуты высокими напряжениями и выброшены в туннель. При изгибе они раскололись на малые фрагменты. Газ высокого давления, расширяясь, способствовал как изгибу плит, так и их отторжению;

- по мере реализации этого механизма формировались новые плиты и процесс повторялся;

- формирование полости выброса было прогрессирующим процессом, начинающимся в забое туннеля и развивающимся в противоположной от него направлении;

- выброшенный со скоростью 10 м/сек. материал «вытекал» на «подушке» или волне газа, которая позволила обломкам пород переместиться на большое расстояние от забоя.

Суммируя, можно сказать, что явление требовало одновременного возникновения двух необходимых предварительных условий – высокой концентрации напряжений и малого объема абсорбированного газа под высоким давлением. Внезапное развитие свободной поверхности при продуктивном взрыве проходческих работ позволило напряжениям в массиве разрушить вновь образованную поверхность забоя и начать процесс напряженного выброса.

События, подобные описанным, происходили в туннелях, проводимых через песчаники в окрестностях угольных пластов глубоких шахт Японии – Sato и Itakura, Франции – Josien, Канады – Aston и др. Здесь близкое соседство с угольными пластами объясняет происхождение газа, а природная пористость песчаника создает очевидные средства хранения газа под давлением. В Японии с 1954 г. произошло 75 выбросов с наибольшим отторжением пород в объеме 990 м³ от забоя и кровли экскавации. Во французской угольной шахте 21 выброс случился на одном горизонте в течение 10 лет. В наибольшем из них было выброшено 3000 м³ пород вместе с 6000 м³ метана. В канадской шахте с глубиной работ, превышающей 700 м произошло 37 событий в течение семилетнего периода. Объемы полостей варьировались от нескольких кубических метров до 316 м³. Во всех случаях отмечалась мелкая плитчатость «луковой шелухи» (onion skin), как неизбежная характеристика породных обломков и стен полости. Характеристика этих выбросов приведена в табл. 2.10.

Таблица 2.10 – Сравнительная характеристика внезапных выбросов пород

Параметры	Шахты				
	Moab Khotsong	Horonai, Япония	Vouters/Reumaux, Франция	N 26 Colliery Nova Scotia, Канада	Ibbenbeuren, Германия
1	2	3	4	5	6
Глубина, м	2800	600	1250/1000	790	более 700
Вид пород	кварцит	песчаник	песчаник	песчаник	песчаник
Число событий	1	75 (с 1954 г.)	26 (1978-1988)	37 (6,5 лет)	много

Продолжение таблицы 2.10

1	2	3	4	5	6
Наибольшая полость, м ³	примерно 100	900	3000	316	до 700
Газ, м ³	неизвестно	1750	8000	3100	до 6500
Отношение газ/объем	неизвестно	3.6:1	от 2:1 до 40:1	от 2,5:1 до 20:1	-
Прочность пород на сжатие, МПа	более 120	120-160	30	76	низкая
Пористость	очень низкая	< 10%	6-12%	5%	10-14%
Давление газа, МПа	неизвестно	2	3-4	3-8	6
«Луковая шелуха»	да	да	да	да	да
Форма фрагментов	чешуйчатая	тонкая скорлупа	пластинки	разрыхленные сколы	неизвестно
Дисковый керн	неизвестно	неизвестно	да	некоторые	да
Отрезок времени	немедленно после взрыва	все за секунду	после последней задержки	вызваны взрывными работами	последовавшие за взрывом

Глава 3. Стратегические и тактические меры управления внезапными выбросами пород

3.1 Общие сведения

В связи с постепенным увеличением глубины горных работ растет их сейсмическая опасность. Так, если в 1991 г. максимальные магнитуды для золотоносных месторождений Южной Африки составляли: Rand – 3,7, Far West Rand – 4,2, Klerksdorp – 4,3, Orange Free State – 3,0, то уже в 1992 г. они возросли соответственно до 4,2; 4,6; 4,9; 4,5. События с такими магнитудами почти определенно связаны с геологическими неоднородностями и подвержены влиянию увеличивающейся площади горных работ.

Усложнение геотехнической обстановки в сейсмоопасных условиях требует адекватного инженерного ответа. За десятилетия научно-исследовательских работ и приобретения практического опыта разработаны стратегические и тактические меры для предотвращения или снижения опасности внезапного выброса пород и уменьшения тяжести их последствий.

К стратегическим мерам относятся:

- изменение системы разработки, в частности, применение длиннозабойных систем (при пологом залегании рудного тела), исключающих оставление опорных целиков на площади добычных работ;
- применение упрочненной закладки выработанного пространства;
- минимизация концентрации напряжений адекватным расположением и ориентацией подземных полостей относительно неоднородных геологических структур и зон опорного давления.

Стратегические крупномасштабные меры, планируемые заранее, применяются на больших площадях шахтного поля. Эти меры относительно неизменны в течение длительного

времени и контрастны по отношению к локальным тактическим методам, которые могут модифицироваться при повышении уровня опасности. Стратегические меры базируются на суждениях об относительных уровнях выбросоопасности, присущих альтернативным вариантам шахтного дизайна.

Тактические меры принимают возможность возникновения выбросов, как неизбежность, но пытаются ограничить распространение разрушений или регулировать возникновение выбросов во времени.

Хотя внезапные выброса пород известны горным инженерам с начала прошлого века и с тех пор предпринимаются значительные усилия по их изучению, до настоящего времени не созданы гарантированно надежные методы прогнозирования или предотвращения этих событий.

Первой реакцией на увеличение случаев выбросов было применение альтернативных методов горных работ. Начальные наблюдения привели к выводам, что целики, формируемые в ходе добычных операций, уязвимы к выбросам. Отсюда последовало решение о целесообразности применения бесцеликовых систем разработки при пологом залегании рудного тела или переход от нисходящего к восходящему порядку отработки горизонтов при крутом залегании.

Движение породных слоев, вызывающее напряжения в массиве, уменьшается при заполнении выработанного пространства закладочным материалом. Это снижает опасность внезапных выбросов пород, хотя и не полностью устраняет их.

Правильное расположение подземных полостей по отношению к геологическим неоднородностям имеет значение как для повышения устойчивости полости (см. книгу авторов «Большие подземные полости: дизайн и строительства», «Норд-Пресс», Донецк, 2009), так и для предотвращения сейсмических проявлений, связанных с этими неоднородностями. Правильная ориентация полости, по возможности,

перпендикулярная к последним, позволяет снизить риск внезапных выбросов.

В некоторых случаях внезапные выбросы предотвратить невозможно из-за либо высоких напряжений, либо фактической геометрии горных работ, уязвимой к выбросам. Применяемые в этих обстоятельствах тактические меры снижения выбросоопасности используют особенности конструкции податливых систем крепи, абсорбирующих сейсмическую энергию, а также возможность перемещения напряженных породных зон от забоя в глубину массива с помощью разгрузочного взрывания.

Крепь для выбросоопасных пород имеет три назначения:

- усиление окружающего массива для того, чтобы управлять обрушением пород;

- если эта цель не достигнута – удержание отторгнутых пород и контроль их перемещения;

- абсорбция энергии, с которой породный материал насильственно и внезапно приведен в движение.

Вид и параметры крепи в общих случаях зависят от прочности и структуры породных масс, которые по мере роста нагрузки могут быть представлены в четырех состояниях:

- состояние упругости. Если предел упругости состоянием пород не превышен, крепь не требуется;

- стабильный рост трещин. Происходит образование невидимых микротрещин, но породные массы стабильны и для дальнейшего распространения трещин требуется увеличение нагрузки. На этой стадии необходимость в крепи зависит от структуры породных масс, например, наличия сочленений породных блоков и складчатости напластования;

- нестабильный рост трещин. После длительного срока стабильности происходит расслоение пород. Растут нестабильные трещины с ослаблением пород вокруг полости. Общим решением на этом этапе служит применение анкерных болтов, арматурных стержней или канатных анкеров. Пара-

метры крепи зависят от структуры пород и интенсивности их разрушения;

- непосредственные срезающие разрушения. Происходит расслоение или интенсивный выброс пород. Если незамедлительная после экскавации установка такой крепи, как болты, арматурные стержни, набрызгбетон с металлической сеткой не стабилизируют ситуацию, в подземных полостях с длительным сроком службы после прекращения деформаций и восстановления равновесия устанавливается монолитная бетонная или сборная железобетонная крепь.

Свойства крепи, используемой в выбросоопасных зонах, зависят от ее роли и ожидаемой тяжести последствий выброса. Когда проблема последствий незначительна, основными требованиями к крепи становятся ее жесткость и прочность, необходимые для усиления пород, окружающих создаваемую полость. Если ожидаются тяжелые повреждения, вызванные выбросом, крепь должна не только усиливать породы, чтобы удержать их от прогиба, но также иметь способность абсорбировать выделяющуюся сейсмическую энергию с помощью специальных конструктивных решений, создающих ее податливость.

Энергия, высвобождающаяся во время выброса и определяемая массой отторгнутых пород и скоростью их отторжения, должна, по возможности, абсорбироваться применяемой системой крепи. В податливых системах, разработанных в последние годы, уровень абсорбированной энергии примерно в 20 раз превышает энергию, абсорбируемую традиционной крепью, обычно применяемой в шахтах и подземном строительстве и показавшей свою неэффективность при серьезных сейсмических событиях.

Другой задачей, относящееся к тактическим мерам предотвращения внезапных выбросов пород, является применение разгрузочного взрывания. Развитие местных концентраций напряжений, увеличивая потенциал опасности выбросов, требует превентивных действий, выполняемых в определен-

ном месте в заданное время и направленных на изменение физико-механических особенностей (в частности, прочности) породного массива перед забоем экскавации. К таким действиям относится разгрузочное взрывание, создающее вокруг подземной полости разгруженную или ослабленную оболочку комбинаций перераспределения напряжений и контролируемого разрушения пород.

Поскольку внезапный выброс связан с упругим поведением хрупких пород, которые потенциально склонны к обрушению при превышении прочности напряжениями, разгрузочное взрывание пытается изменить хрупкую структуру пород на вязкую. Таким образом, в породах не только уменьшаются напряжения, но также создаются зоны податливости по контуру полости.

Разгрузочное взрывание показало свою эффективность в борьбе с внезапными выбросами пород, однако, из-за неоднозначности результатов его следует применять только в особенно опасных ситуациях таких, как высоко напряженные добычные уступы, целики или забои выработок туннельного типа.

Серьезное внимание вызывает применение разгрузочного взрывания в напряженных целиках. Некоторые компании разработали стандарты для этих работ, включающие технологию бурения скважин, их расположение, выбор взрывчатых материалов, детали заряжения и взрывания. Разгрузка целиков часто делается с применением индивидуального подхода к каждому конкретному случаю и обычно планируется на основе прошлого опыта проб и ошибок, поскольку дизайн подобных взрывных работ изучен недостаточно.

Существует два пути разгрузки целиков. Во-первых уменьшение жесткости целика достигается трещинообразованием в результате разгрузочного взрывания. Однако, при этом напряжения, изначально вызванные целиком, могут передаваться окружающему породному массиву или соседним целикам, вызывая их нестабильность.

Во-вторых динамическая природа разгрузки может стать триггером (спусковым механизмом) большого сейсмического события, которое эффективно высвобождает энергию напряжений, сотрясая целик и проявляясь во внезапном выбросе пород. Предполагается, что такая сотрясательная разгрузка может считаться успешной только, если высвобождаемая при этом сейсмическая энергия превышает энергию, содержащуюся собственно во взрыве.

Учитывая сложность проблемы наличия напряженных целиков, которые служат источниками внезапных выбросов, шахты стараются применить системы разработки, вообще устраняющие необходимость в опорных целиках (например Lucky Friday в США, Campbell и Macassa в Канаде).

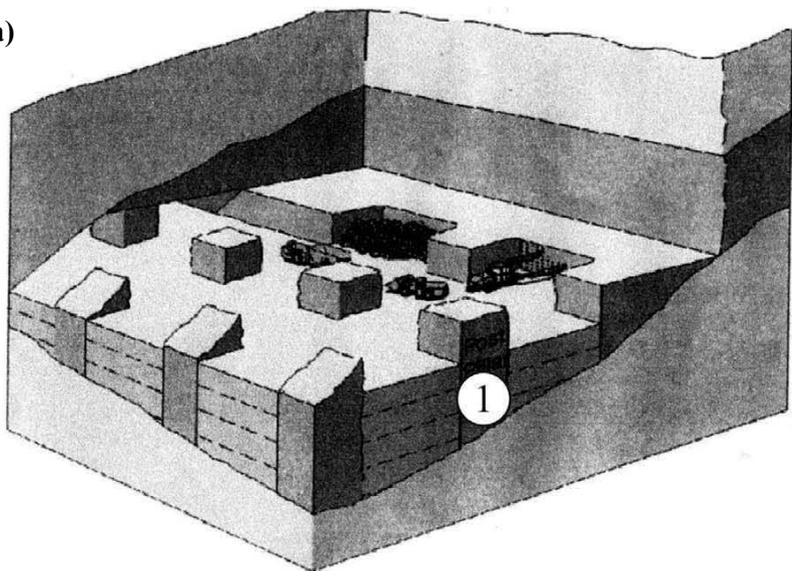
Рассматривая достоинства разгрузочного взрывания, следует иметь в виду, что оно, как уже говорилось, не всегда показывает надежные результаты. Требуется большие усилия, затраты труда и времени для разработки дизайна разгрузочного взрывания, отвечающего поставленным целям обеспечения безопасных условий работ.

3.2 Стратегические меры предотвращения внезапных выбросов пород

В основе стратегических мер по снижению выбросоопасности в условиях работы глубоких шахт лежат технологические решения. Однако, систематизированный подход к их детальному рассмотрению выходит за рамки данной книги. Поэтому далее принципиальные схемы таких решений показаны только в общих чертах, что относится, например, к применению длиннозабойных бесцеликовых систем разработки вместо короткозабойных (рис. 3.1) и технологии закладочных работ (рис. 3.2).

Учитывая особую сложность, трудоемкость и недостаточную теоретическую изученность закладочных работ, влияние их параметров на количество высвобождаемой сейс-

a)



б)

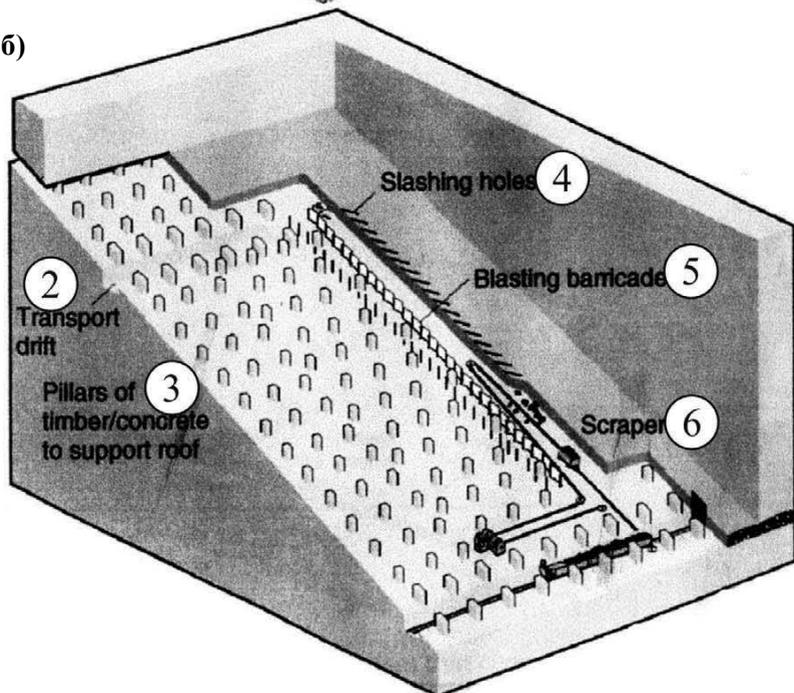


Рис. 3.1. Системы разработки пологих рудных месторождений

Объяснения к рис. 3.1:

а) короткозабойная система.

б) длиннозабойная система.

1 – целик; 2 – транспортный штрек; 3 – деревянные или бетонные опоры кровли; 4 – взрывные скважины; 5 – ограждение; 6 – скрепер.

мической энергии, а, следовательно, на потенциал выбросоопасности, анализировалось компьютерной моделью. Для условий шахт Южной Африки рассматривалась гипотетическая площадь разработки 3х3 км с падением рудного тела под углом 21⁰ и оставлением в ее центре приствольного целика размером 1х1 км на весь срок службы шахты. Выемка рудного тела осуществлялась подвиганием забоев по простиранию на средней глубине 3200 м с мощностью выемки 1,0 м. Сравнивались следующие случаи:

- полное извлечение запасов рудного тела;

- оставление по простиранию целиков шириной 20м, разделенных интервалами 140 м (т.е. один целик на три обычных уступа шириной по 40 м), что обеспечивало уровень извлечения руды 85%;

- создание породных закладываемых полос шириной 40 м, разделенных интервалами 120 м (т.е. одна полоса на три панели шириной по 40 м) с закладкой 33% отрабатываемой площади. Рассматривалась возможность уплотнения полосы до 50%, 60% и 70% от мощности выемки;

- то же, что и предыдущий случай, но с одной полосой на каждые 2 уступа, т.е. с закладкой 50% отрабатываемой площади;

- то же, что и предыдущий случай, но с закладкой 100% отрабатываемой площади.

Результаты моделирования показаны в табл. 3.1, где для различных рассматриваемых условий оценивался темп высвобождаемой энергии ERR.

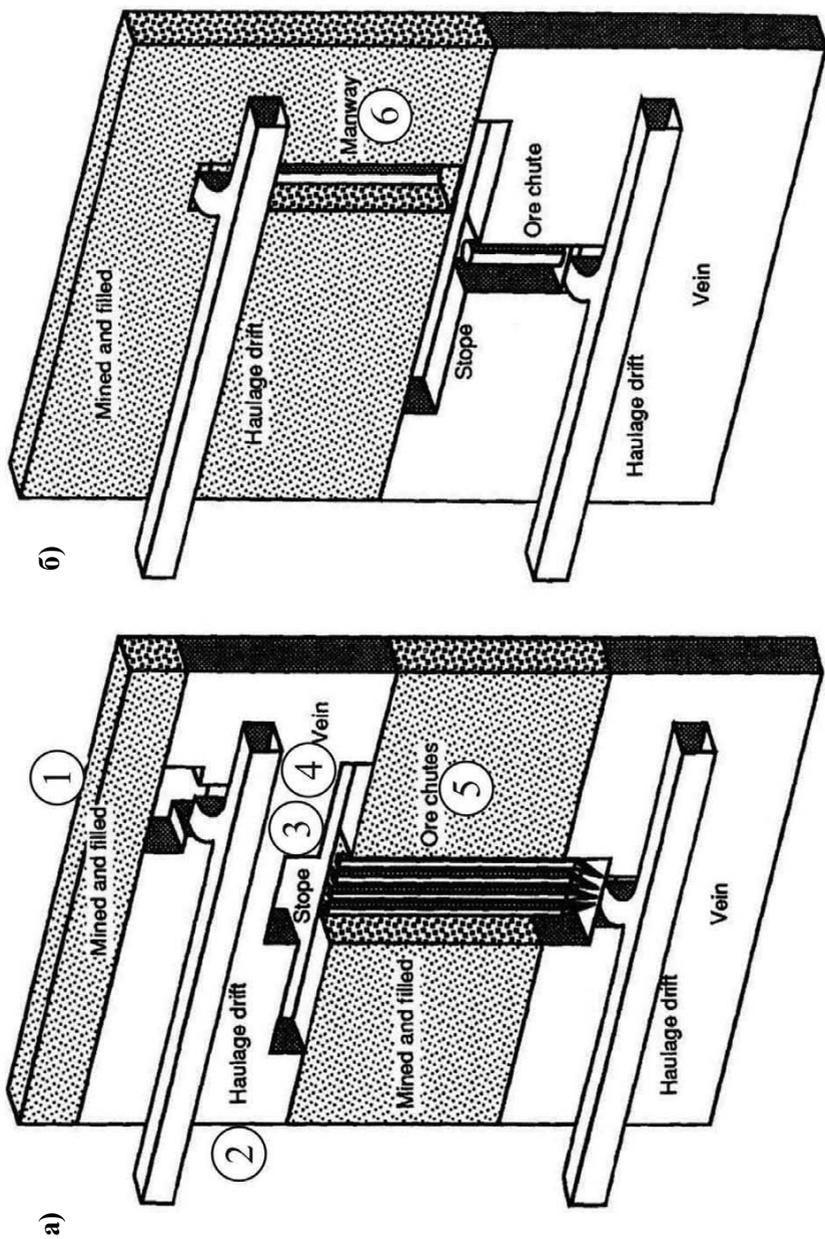


Рис. 3.2. Системы разработки и технологии закладочных работ кругопадающих рудных месторождений

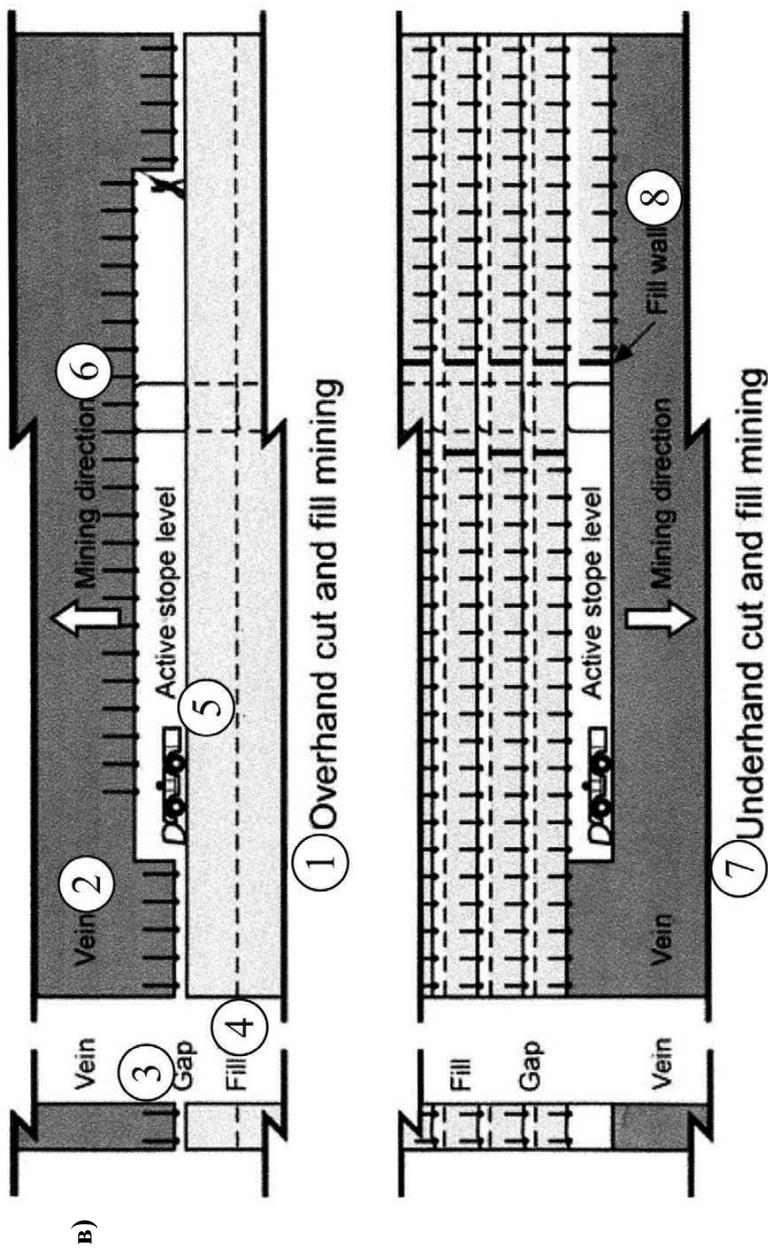


Рис. 3.2. Системы разработки и технология закладочных работ крутопадающих рудных месторождений (окончание)

Объяснения к рис. 3.2:

а) потолкоуступный забой;

б) почвоуступный забой.

1 – отработанная площадь с закладочным материалом; 2 – транспортный штрек; 3 – уступ; 4 – жила; 5 – рудоспуск; 6 – людская восстающая выработка.

в) технология добычных и закладочных работ в потолкоуступном и почвоуступном забоях.

1 – потолкоуступный забой; 2 – жила; 3 – щель; 4 – закладка; 5 – уровень действующего забоя; 6 – направление отработки; 7 – почвоуступный забой; 8 – закладочная стена.

Таблица 3.1 – Темп высвобождаемой энергии ERR (MJ/m²) для разных параметров закладки выработанного пространства

Закладка				Полное извлечение	Целики
степень уплотнения					
Закладываемая площадь	50%	60%	70%	68	11
33%	43	36	28		
50%	40	33	25		
100%	37	29	22		

Из таблицы видно, что эффективность закладки определяется степенью ее уплотнения. Наименьший уровень высвобождаемой при выбросах в добычных уступах энергии обеспечивается оставлением целиков, однако, в таком случае они сами становятся источниками опасности внезапных выбросов пород.

К стратегическим мерам предотвращения выбросов относится также изменение ориентации подземных полостей, что позволяет избежать встречи с нарушенными зонами или другими неоднородностями массива. На рис. 3.3 показан пример начальной ориентации главного (силового) и трансформаторного залов электростанции, выбранной без учета геологической обстановки, а также окончательное располо-

жение этих полостей, принятое в соответствии с конкретными условиями места строительства.

К стратегическим мерам предотвращения внезапных выбросов пород можно также отнести расположение выработок туннельного типа в зонах, разгруженных от напряжений, вызванных горными работами. Наглядным примером целесообразности этого решения служит возникновение сейсмической опасности для полевых штреков шахты Тау Тона, Южная Африка, когда геотехническая обстановка заставила их выйти из разгруженной зоны и расположиться в области влияния опорного давления крупного целика, оставшегося после отработки предыдущих горизонтов.

Золотодобывающая шахта Тау Тона разрабатывает месторождение Carbon Leader Reef с рабочей мощностью 1,0м и размером по простиранию 5 км, по падению 3,5 км, залегающего под углом 20° . Глубина горных работ, самая большая в мире, составляет 3456 м (рис. 3.4, 3.5).

Руда залегает в крепких кварцитах мощностью до 70м, под которым находятся сланцы мощностью около 150 м. Отработка уступов длиной по 35 м производится с помощью буровзрывных работ со скреперной транспортировкой руды вдоль забоя. С целью предотвращения внезапных выбросов в работающих забоях производится разгрузочное взрывание со скважинами глубиной не менее 2.4 м, расположенными на расстоянии 3 м друг от друга. Отработанные уступы закладываются.

Подготовка уступов производится временными и постоянными полевыми штреками (выработками туннельного типа), которые располагаются под выработанным пространством (в лежачем боку массива пород) с отставанием от добычных забоев. Временные полевые штреки сечением 3,0х3,0м располагаются на расстоянии 20 м от выработанного пространства, постоянные, сечением 3,5х3,5 м – на расстоянии от него 70-80м.

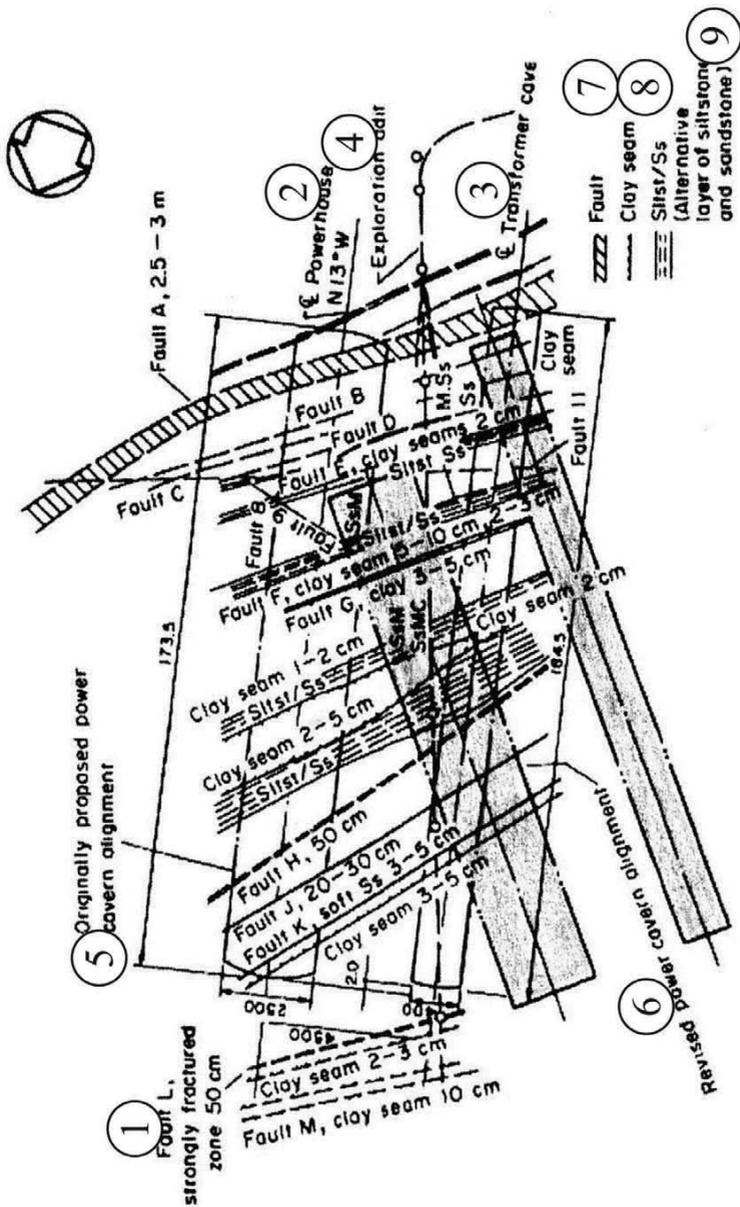


Рис. 3.3. Первоначальная и окончательная ориентация подземных полостей электростанции
 1 — нарушение; 2 — главный зал; 3 — трансформаторный зал; 4 — разведочный туннель; 5 — первоначальная ориентация полостей; 6 — окончательная ориентация полостей; 7 — нарушение; 8 — слой глины; 9 — алевролиты и песчаники.

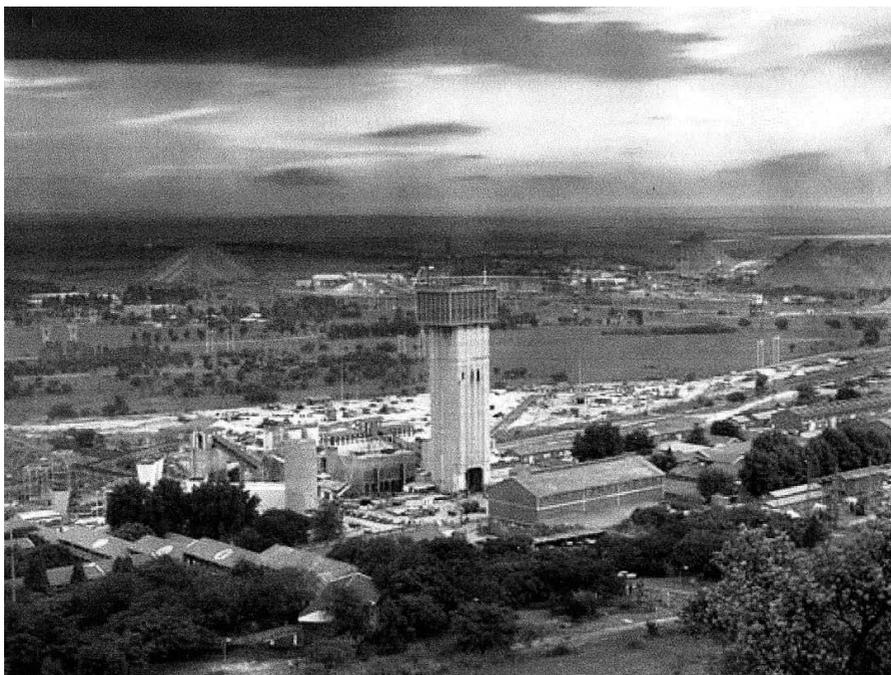


Рис. 3.4. Шахта Tau Tona

Расположение штреков в зоне, разгруженной от горного давления добычными забоями, снижает сейсмическую опасность и требования к крепи. Временные полевые штреки, как правило, вообще не крепятся. Постоянные штреки крепятся затампонированными гладкими стержнями диаметром 16 мм, устанавливаемыми по периметру сечения рядами с интервалом между ними 1,5 м. Каждый ряд крепи содержит 9 анкеров, расположенных друг от друга на расстоянии 1,3 м. Штреки также крепятся затампонированными канатными анкерами длиной 3,8 м и набрызгбетоном по металлической сетке с толщиной слоя 50 мм.

При подготовке горизонта 109 полевые штреки встретили геологическое нарушение SOB, простирающееся с северо-востока на юго-запад и разрывающее рудное тело на 12-20 м.

У нарушения и его ответвлений на вышележащих горизонтах оставлялся целик (рис. 3.6).

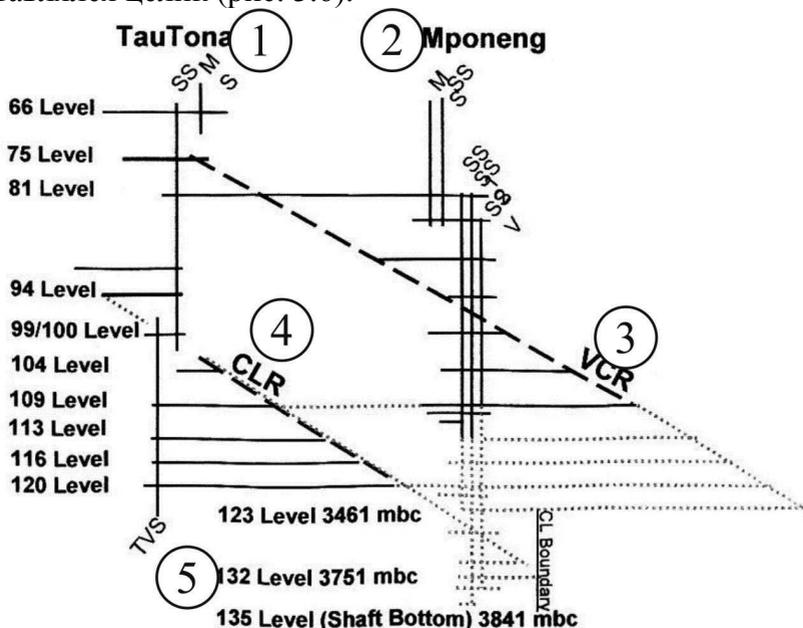


Рис. 3.5. Схема вскрытия шахты Tau Tona

1 – шахта Tau Tona; 2 – шахта Mponeng; 3 – месторождение Ventersdorp Contact Reef; 4 – месторождение Carbon Leader Reef; 5 – горизонты работ

Компьютерное моделирование условий перехода штреками напряженной зоны, созданной целиком, показало целесообразность замены жестких стержней анкерной крепи на податливые болты Durabar (см. далее), имеющие способность абсорбировать сейсмическую энергию. Применялся также набрызгбетон, армированный мелкими металлическими стержнями, который наносился с отставанием от забоя до 5 м. В зонах действия высоких напряжений устанавливались канатные анкера длиной 10 м.

При проведении 26 мая 2003 г. полевых штреков в зоне целика без предварительных разгрузочных работ и при пересечении нарушения произошел внезапный выброс пород, со-

стоящий из сдвоенного события с магнитудами 2,8 и 3,1 (рис. 3.6, 3.7) и радиусами воздействия 67-69 м и 200 м соответственно. Им предшествовала серия меньших событий 25 мая 2003 г. с магнитудами 0,5-2,5. Выброс был вызван перемещением плоскости нарушения на 150 мм.

Несмотря на ранее принятые меры по усилению крепи, внезапный выброс пород привел к серьезным повреждениям штреков. Они были засыпаны на площади, показанной на рис. 3.8. Выброшенная порода была тонко измельчена, но стены штреков остались в приемлемом состоянии. Расстояние между сочленениями породных блоков было равно примерно 1 м (рис. 3.9). На рисунке также показан анкер Dugabar, распрямленный при падении фрагмента породы.

Высота полости выброса варьировалась волнообразно вдоль длины поврежденной зоны и местами составляла до 2 м (рис. 3.10).

Механизм внезапного выброса объяснялся следующими соображениями:

- энергия упругости, хранящаяся в большом объеме пород (возможно 10^5 м^3) внезапно высвободилась скольжением массива вдоль нарушения SOB;

- при сейсмическом событии скольжение одной плоскости нарушения относительно другой начинается в каком-то критическом дефекте или разрушенном месте на поверхности нарушения. Фронт скольжения расширяется вдоль поверхности нарушения, двигаясь со скоростью равной большой доле скорости волны среза. Общая площадь перемещения может расширяться до круга радиусом 200 м, прежде чем напряжение перемещения не ослабится до степени невозможной для продавливания далее фронта скольжения;

- скорость скольжения может достигать значения 8 м/сек. в ходе перемещения плоскостей нарушения на 150-200 мм, вызывая сейсмическое событие с магнитудой 3,0;

- результат этого перемещения передается массиву, как внезапный подъем давления (волны напряжений двигаются со

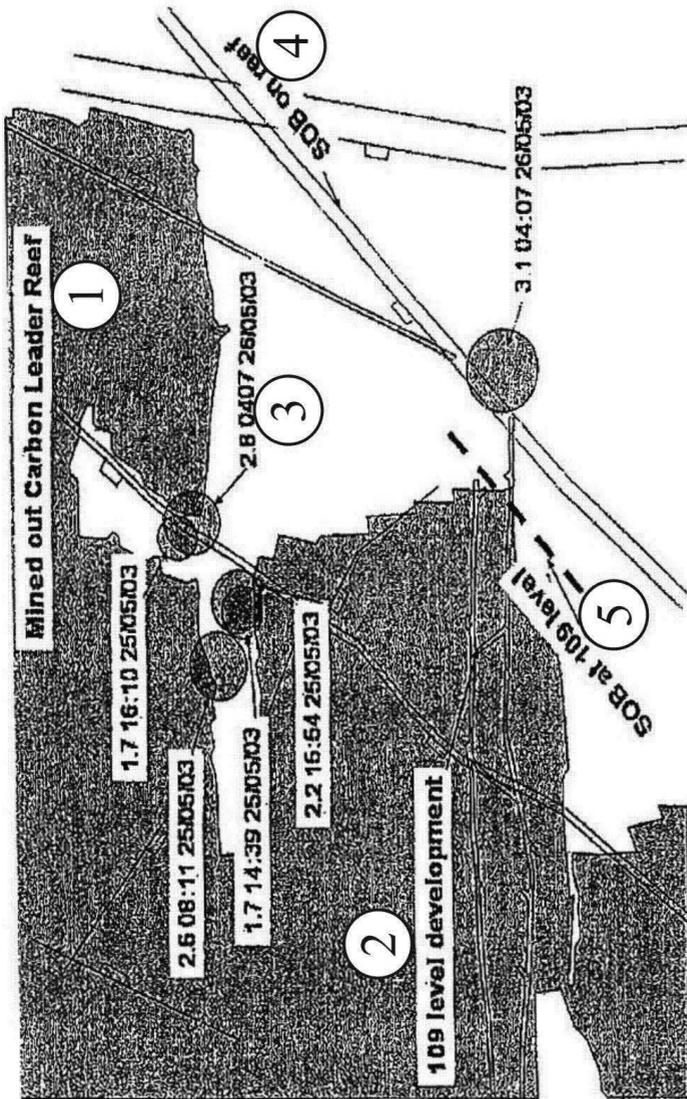


Рис. 3.6. План горных работ с указанием главных сейсмических событий
 1 – выработанное пространство; 2 – подготовка гор. 109; 3 – внезапный выброс пород; 4 – нарушение SOB; 5 – положение нарушения SOB на гор. 109.

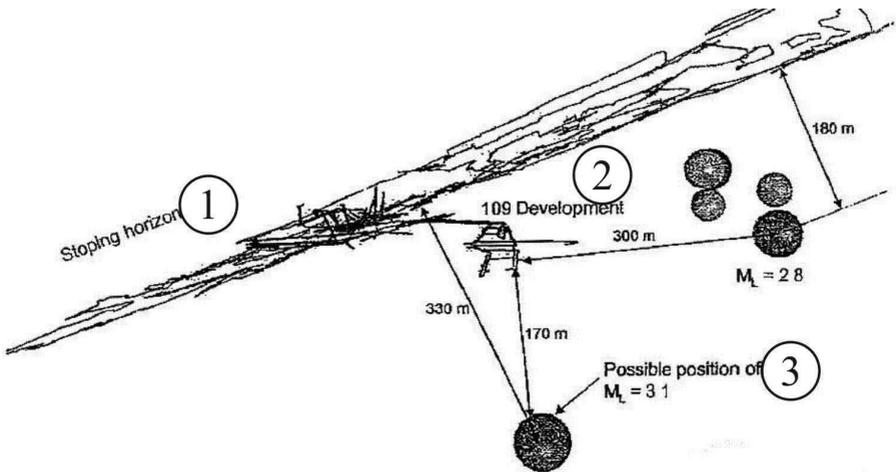


Рис. 3.7. Вертикальный разрез гор. 109 шахты Тау Тона
 1 – разрабатываемый горизонт; 2 – подготовка гор. 109; 3 – расположение сейсмического события.

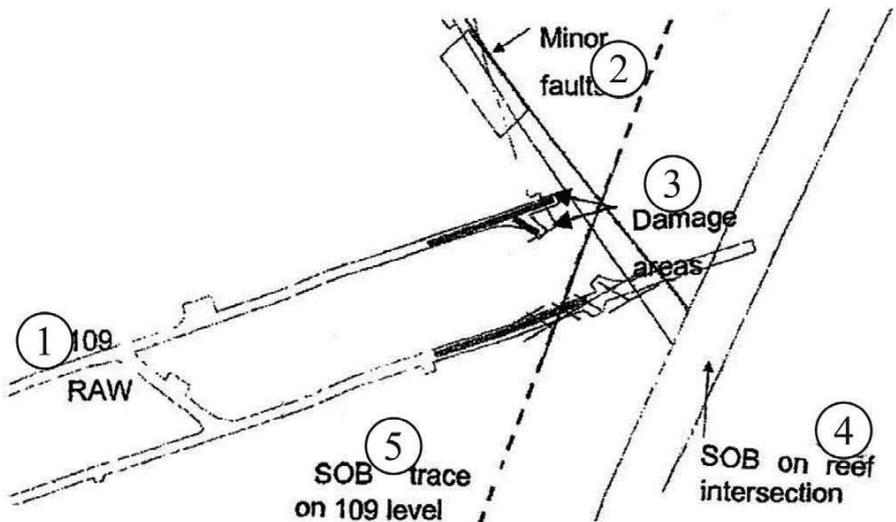


Рис. 3.8. План туннелей (полевых штреков) гор. 109 с зонами повреждений
 1 – вентиляционный туннель гор. 109; 2 – малое нарушение; 3 – зона повреждений; 4 – нарушение SOB; 5 – положение нарушения SOB на гор. 109.



Рис. 3.9. Последствия внезапного выброса с раскрывшимися сочленениями пород и распрявленным стержнем Durabar

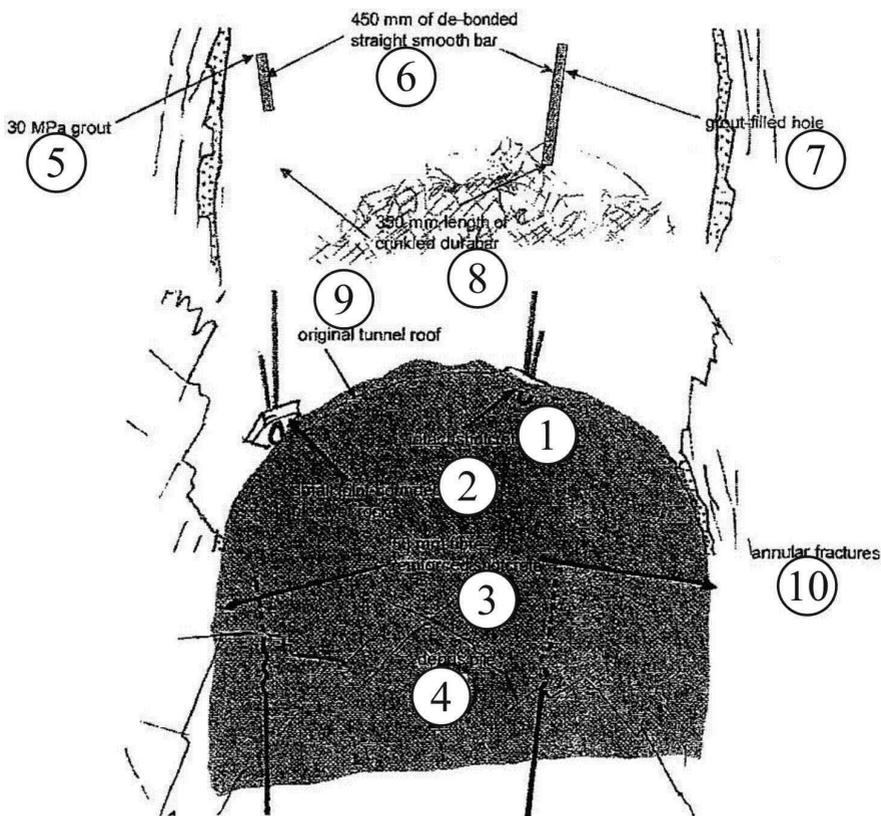


Рис. 3.10. Схема повреждений, вызванных внезапным выбросом в выработке туннельного типа

1 – незатронутый набрызгбетон; 2 – малые связанные блоки пород; 3 – армированный набрызгбетон толщиной 50 мм; 4 – обломки породы; 5 – тампонаж; 6 – выпрямленный участок стержня Durabar; 7 – затампонирующая скважина; 8 – начальный контур кровли туннеля; 9 – изогнутый участок стержня Durabar; 10 – трещины в периметре туннеля.

скоростью нескольких тысяч метров в секунду). Энергия передается, как сжимающие и срезающие вибрации, где частицы породы колеблются с амплитудами от миллиметров до долей миллиметров с начальной скоростью равной половине

скорости скольжения плоскостей нарушения, т.е. около 4м/сек.

Рассмотрение описанных обстоятельств внезапного выброса показывает, что:

- если расстояние между поверхностью нарушения и местом повреждений невелико, большая часть вибрационной энергии переносится волнами высокой частоты (короткой длины), которые могут взаимодействовать с относительно малыми поверхностями выработки и даже неоднородностями породного массива такими, как сочленения блоков или трещиноватость;

- вдоль плоскости нарушения интенсивность энергии достаточна, чтобы раскрывать существующие малые неоднородности массива и, вероятно, формировать свежие трещины. Поверхности породных слоев могут отражать и распространять «ударные» волны в близкой окрестности туннеля.

3.3 Тактические меры предотвращения внезапных выбросов пород

3.3.1 Основные принципы дизайна податливой крепи подземных полостей

Дизайн крепи подземных полостей требует решения многих сложных проблем, связанных с оценкой нагрузок, возникающих при горных работах. Часто даже трудно правильно определить, какие структуры находятся в состоянии риска и поэтому требуют применения крепи. Это особенно сложно, когда угроза носит динамический характер и проявляется в форме тяжелых последствий выброса пород, индуцированного горными работами.

Главными задачами систем крепи при горнодобывающих операциях в глубоких шахтах являются:

- обеспечение безопасности персонала и оборудования;

- удержание полости экскавации в функциональных размерах;
- оптимизация в системе крепи соотношения «стоимость – эффективность».

Для достижения этих целей, особенно в условиях больших деформаций, элементы крепи должны сохранять сопротивление давлению без риска разрушения, а блоки или фрагменты пород – удерживаться между точками приложения усилий крепи, чтобы предотвратить рассоединение и возможное последующее обрушение трещиноватых пород.

К системе крепи, применяемой в выбросоопасных породах, обычно предъявляются требования:

- высокой начальной жесткости элементов, усиливающих породные массы;
- увеличение диапазона податливости соответствующих элементов конструкции;
- эффективной интеграции этих элементов;
- сохранения функций в условиях высоких нагрузок;
- поддержание целостности окружающего породного массива;
- возможности создания плотности крепи, выдерживающей нагрузку, по крайней мере $0,6 \text{ т/м}^2 = 60 \text{ кН/м}^2$.

Первичная функция крепи заключается в управлении напряженностью массива. Когда крепь установлена, она начинает упруго деформироваться. Максимальное упругое напряжение, воспринимаемое системой крепи, и максимальное давление на нее определяются конструктивными решениями податливости элементов.

В зависимости от параметров системы крепи, породных масс, окружающих полость, и уровня напряжений в массиве, крепь упруго деформируется в соответствии с конвергенцией периметра полости, когда ее забой отодвигается от участка установки крепи. Если она установлена слишком поздно, породные массы успевают деформироваться до такой степени, что их разрушение становится необратимым. С другой сторо-

ны, если возможности крепи неадекватны, ее податливость может проявиться еще до того, как этого потребует уровень деформации.

Процесс расслоения пород по периметру полости начинается сразу после подвигания забоя, тогда как полное распространение разрушенной зоны может занять некоторое время. Малые падения пород могут происходить близко к забою и представлять угрозу персоналу. Подобные явления имеют динамический характер и становятся наиболее угрожающими в высоко напряженных и выбросоопасных породах, что должно быть учтено конструкциями крепи.

Классический подход, используемый в дизайне инженерных структур, – рассмотрение и оценка отношений между значением C – прочностью или противодействующей силой элемента крепи и D – напряжением пород или воздействующей силой. Важной характеристикой структуры служит фактор безопасности, определяемый, как $F = C/D$. Разрушение структуры происходит, когда $F < 1$.

Величина фактора безопасности обычно устанавливается из предыдущего опыта успешного дизайна. Так, фактор безопасности равный 1,3 считается адекватным для временных шахтных полостей, для постоянных полостей он должен достигать значений 1,5-2.

Основное отличие крепи шахтных полостей от гражданских и инженерных структур заключается в том, что первая должна выдерживать большие деформации, как результат изменяющихся напряжений, вызванных развивающимися горными работами. Крепь должна оставаться эффективной в постепенно разрушающихся породах и выдерживать динамические нагрузки.

Разрушение напряженных породных масс развивается, начиная от хрупкого расслоения и образования плит. Пластическая деформация массива, окружающего подземную полость, не обязательно означает его обрушение. Разрушенный материал еще имеет значительную прочность при толщине

пластической зоны малой по сравнению с сечением полости, когда единственным свидетельством разрушения материала служат несколько трещин и небольшое распространение осыпания и расслоения.

С другой стороны, при формировании большой пластической зоны и больших перемещениях вовнутрь полости ее стен, ослабление разрушаемых породных масс приводит к их тяжелому расслоению, отторжению фрагментов и, в конце концов, к обрушению неподдерживаемой части полости.

При внезапных выбросах пород такое отторжение происходит с высокой скоростью, достигающей 50 м/сек. В дизайне крепи предусматривается скорость 5-10 м/сек. и толщина слоя выброшенных пород – 1 м. Плотность установки крепи и характеристики ее нагрузки и податливости должны быть такими, чтобы крепь обладала достаточной способностью абсорбции энергии и ее рассеивания в пределах приемлемо малой способности деформации.

Критерий для адекватности этим требованиям конструкции крепи может быть сформулирован следующим образом: энергия, абсорбируемая элементом крепи, должна превышать кинетическую энергию, генерируемую движением пород, относящимся к этому элементу (кинетическая энергия движения пород определяется, как произведение половины рассматриваемой массы пород и квадрата скорости, с которой инициируется отторжение этой массы).

Поскольку повреждения, вызванные внезапными выбросами включает разрушение или насильственное перемещение пород, крепь должна абсорбировать энергию порядка 100кДж/м^2 . Для достижения этого уровня необходимо, чтобы поддерживающие элементы крепи имели способность податливости и соответствующую прочность, а их сопротивление могло поддерживаться в ходе перемещения пород.

3.3.2 Податливая металлическая штанговая крепь

С начала 1970-х гг. в выработках туннельного типа на шахтах большой глубины широкое распространение получили металлические стержни (рис. 3.11), часто тампонируемые (рис. 3.12, 3.13) и обычно устанавливаемые с металлической сеткой (рис. 3.14). Вместо стержней в некоторых условиях применяются канатные анкера (рис. 3.15). Связь и усиление крепи осуществляются металлическими полосами (рис. 3.16) и канатами (рис. 3.17).

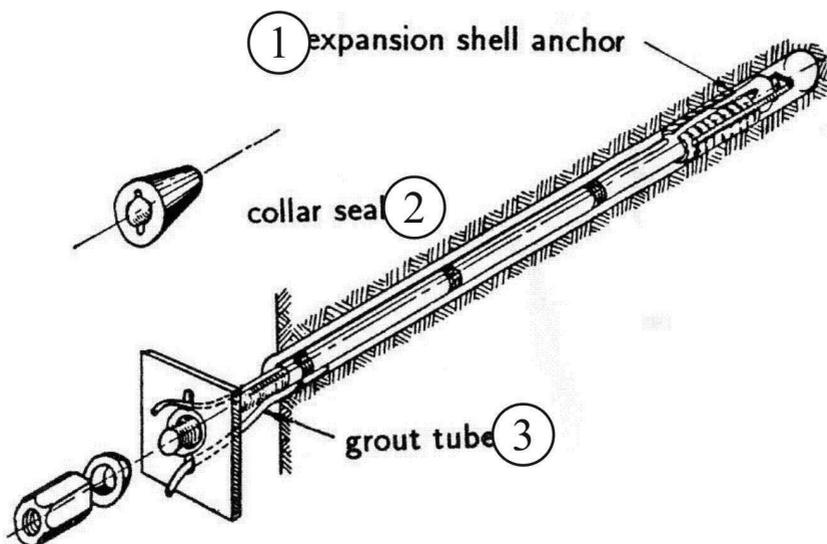


Рис. 3.11. Механический анкерный болт

1 – расширяющийся анкер; 2 – герметизирующий воротник;
3 – тампонажная труба.

Позднее в качестве стержней начали применяться арматурные стальные штанги диаметром, как правило, 16 мм с одним концом, загнутым в виде крюка (shepherd's crook) (рис. 3.18). Испытывалась, но не получила широкого распространения из-за высокой стоимости рамная податливая металлическая крепь (рис. 3.19).

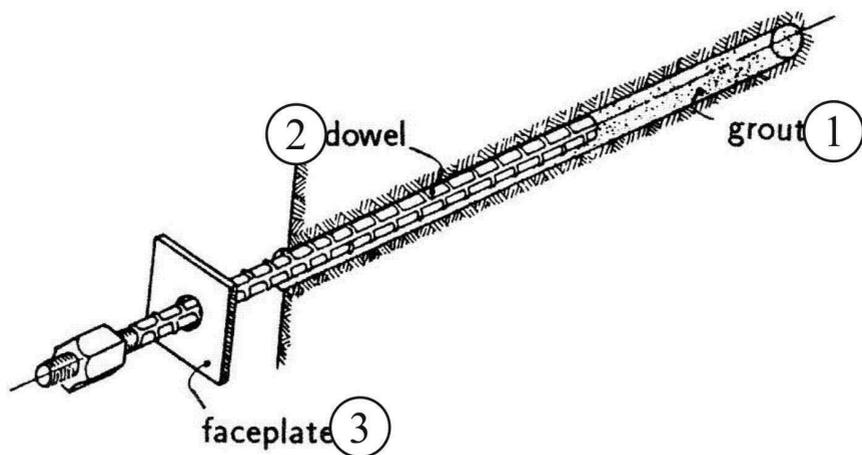


Рис. 3.12. Затампонированный болт
 1 – тампонаж; 2 – стержень; 3 – плита.

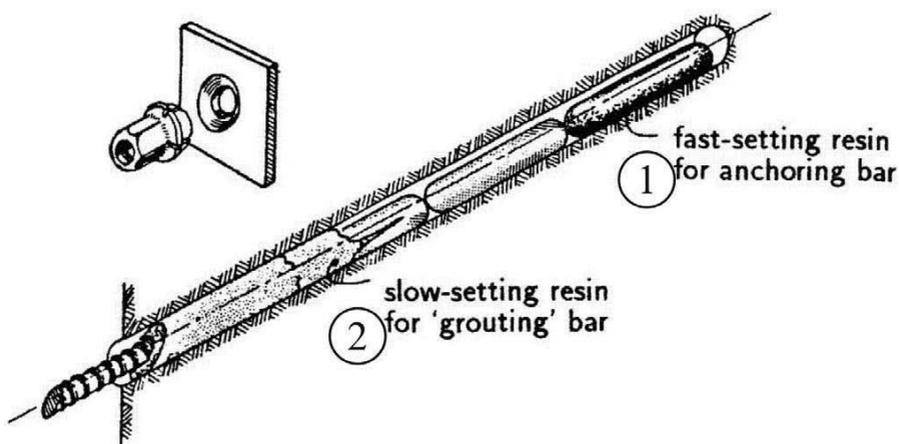


Рис. 3.13. Полимерный тампонаж болта
 1 – быстротвердеющий полимер для анкерования стержня;
 2 - медленнотвердеющий полимер для анкерования стержня.

Исследования и практика показали, однако, неадекватность применявшейся штанговой крепи условиям внезапных выбросов пород. Из осмотра мест повреждений после выбросов стало ясно, что хорошо затампонированный стержень

имеет возможность податливого удлинения всего на 50мм, после чего происходит его хрупкое разрушение, а энергоабсорбирующая способность на практике не превышает 1,4кДж на элемент. Наблюдения повреждений на большой длине туннелей подтверждают несоответствие такой обычно применяемой крепи реальным геологическим условиям.

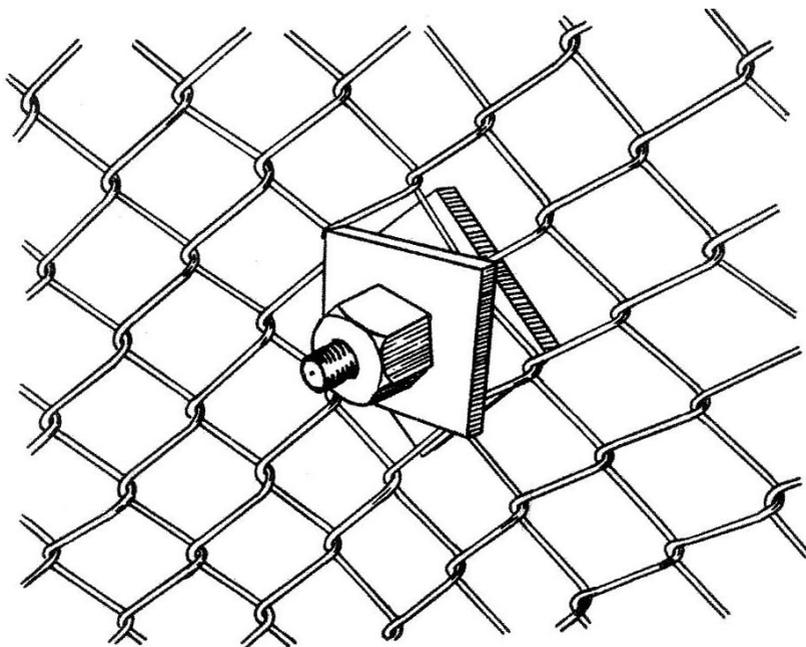


Рис. 3.14. Ограждающая сетка

Поэтому дальнейшим шагом в поиске решений, отвечающих выбросоопасной обстановке, была разработанная в поздних 1990-х гг. конструкция так называемого конусного болта, который вначале применялся только в двух или трех шахтах (рис. 3.20). Нежелание широко использовать этот вид крепи объяснялось его более высокой стоимостью по сравнению с жесткими затампонированными арматурными стержнями. При этом, однако, не принималась во внимание стоимость потери продукции при возможном внезапном выбросе

и расходы на ремонтно-восстановительные работы в поврежденных структурах.

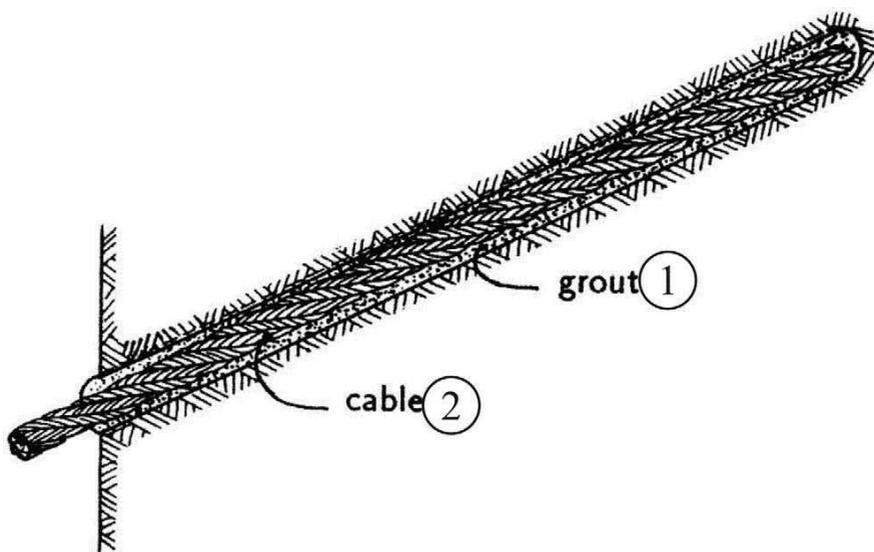


Рис. 3.15. Тампонируемый канатный анкер

1 – тампонаж; 2 – канат.

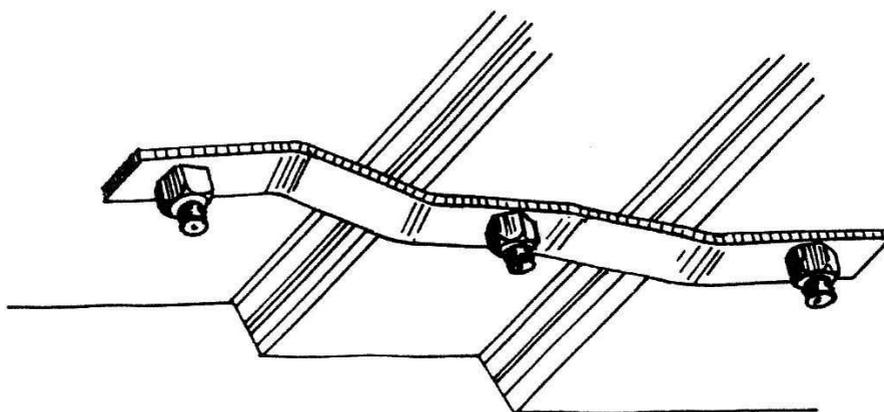


Рис. 3.16. Металлическая полоса

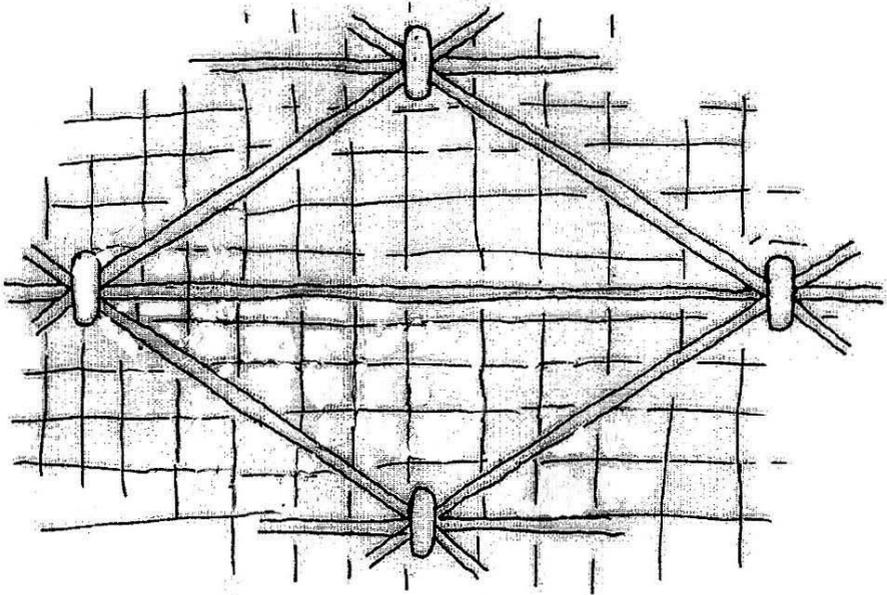


Рис. 3.17. Усиление крепи канатами

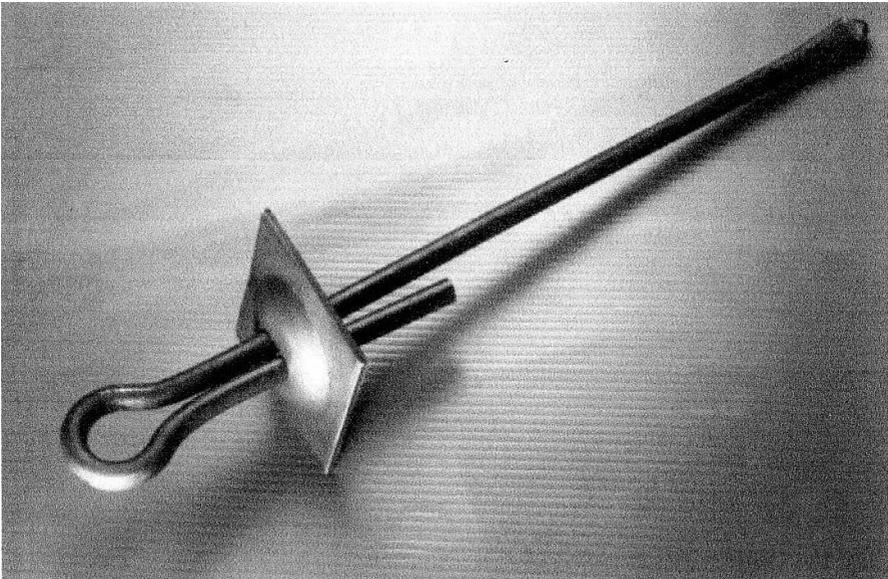


Рис. 3.18. Анкер типа Shepherd's crook

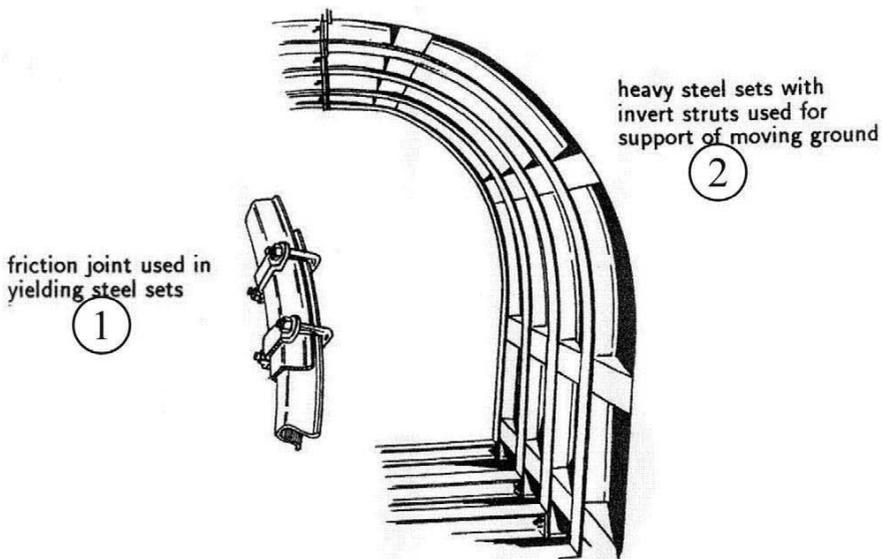


Рис. 3.19. Податливая металлическая рамная крепь
1 – элемент податливости; 2 – тяжелый стальной комплект.

a)

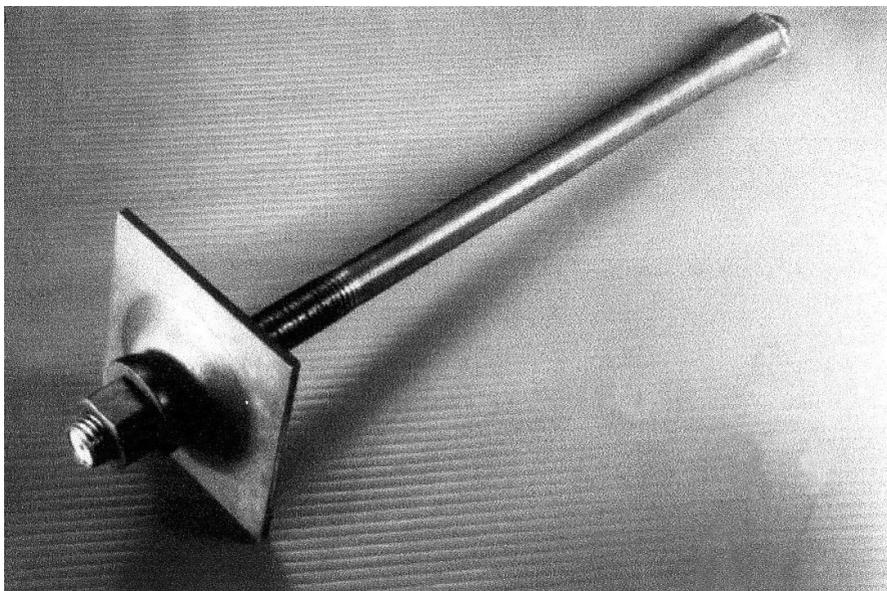


Рис. 3.20. Конструкция и применения конусных болтов

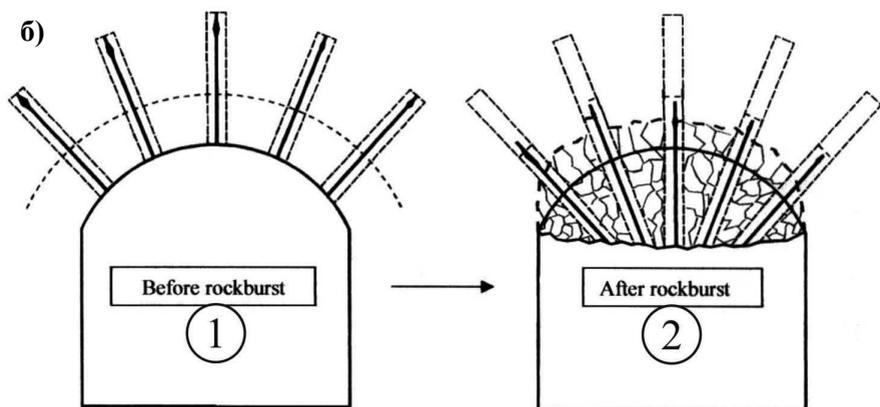


Рис. 3.20. Конструкция и применения конусных болтов (окончание)

*а) – общий вид конусного болта; б) – схема удержания конусным болтом кровли туннеля до и после внезапного выброса пород;
1 – до выброса; 2 – после выброса*

При изготовлении податливых стержней таких, как конусный болт, максимальное сопротивление перемещению пород предусматривается равным 75% прочности на растяжение. Это означает, что сопротивление стержня поддерживается при больших перемещениях, движение отторгнутого материала ограничивается, повреждения туннеля уменьшаются.

Такой результат достигается разницей в энергии, поглощаемой конусным болтом по сравнению с затампонированным арматурным стержнем. Эта разница может быть показана примером, приведенным на рис. 3.21, где иллюстрируется отторжение блока массой $m = 2,0$ т со скоростью 8 м/сек сейсмической волной с соответствующей энергией. В случае рис. 3.21 а(i) блок поддерживается конусным болтом диаметром 22 мм, чья характеристика «груз-перемещение» показана на рис. 3.21 в(i). В случае рис. 3.21 а(ii) блок поддерживается полностью затампонированным арматурным стержнем с прочностью разрушения 270 кН. Кинетическая энергия, приданная блоку, равна 64 кДж (расчет не приводится).

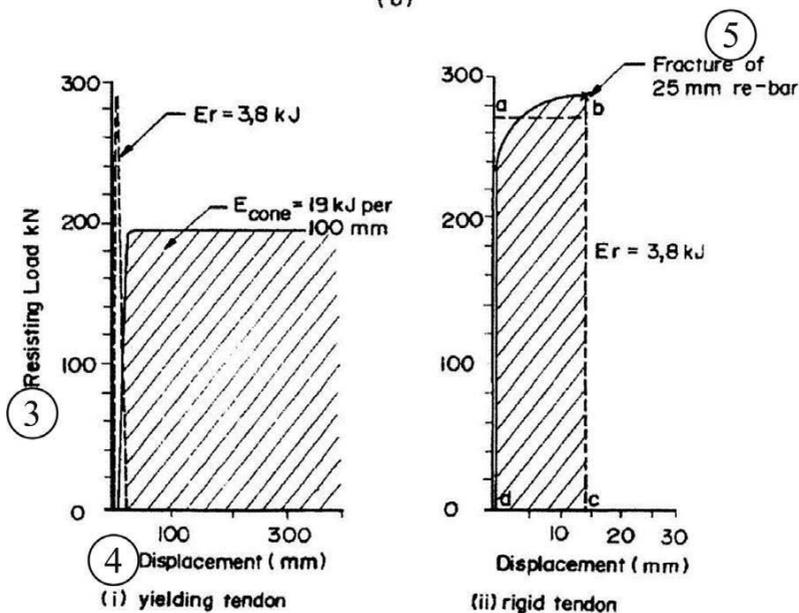
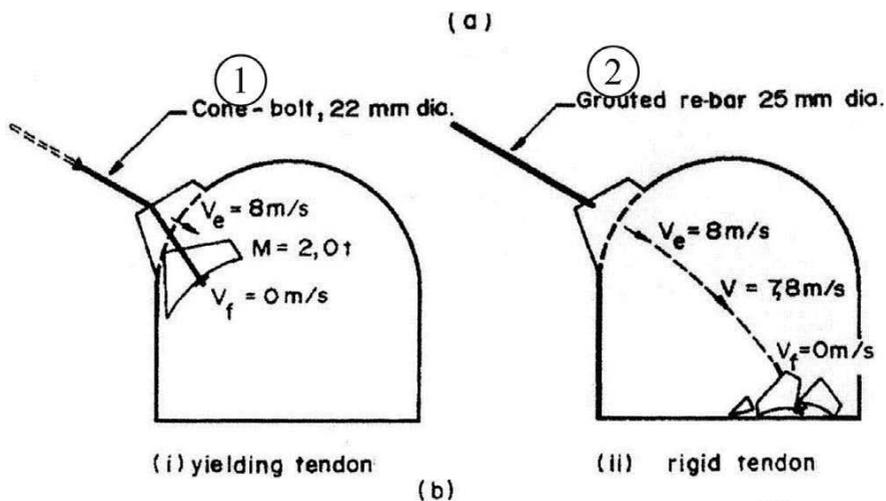


Рис. 3.21. Концептуальная модель отторжения блока

a) модель отторжения блока.

i – податливый стержень (конусный болт); ii – жесткий стержень (затампонируванный).

в) перемещения (деформации), мм.

1 – конусный болт; 2 – затампонируванный стержень; 3 – воспринимаемая нагрузка; 4 – перемещение; 5 – трещина.

Предположим, что с каждой стороны поверхности трещины, встреченной стержнем, тампонированное заполнение скважины разрушилось на длине 50 мм (рис. 3.22), позволяя стержню растянуться на максимально возможное расстояние 100 мм (нормально около 14% под статической нагрузкой). Энергия, поглощенная в пластической деформации металла, показана под кривой рис. 3.21 в(ii) и равна примерно площади abcd, т.е. 3,8 кДж (расчет не приводится), что составляет всего около 5% кинетической энергии, сообщенной стержню.

Энергия породного блока, остающаяся после разрыва стержня, равна

$$E = 64 - 3,8 = 60,2 \text{ кДж},$$

откуда скорость отторжения породного блока составит

$$V = \sqrt{\frac{E}{0,5m}} = \sqrt{\frac{60,2}{0,5 \cdot 2}} = 7,8 \text{ м/сек.},$$

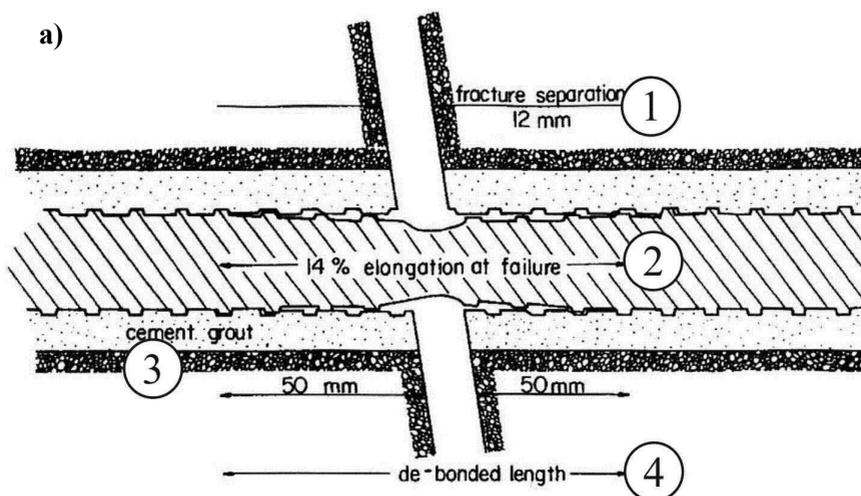


Рис. 3.22. Разрез по скважине с затампонированным жестким стержнем и с конусным болтом

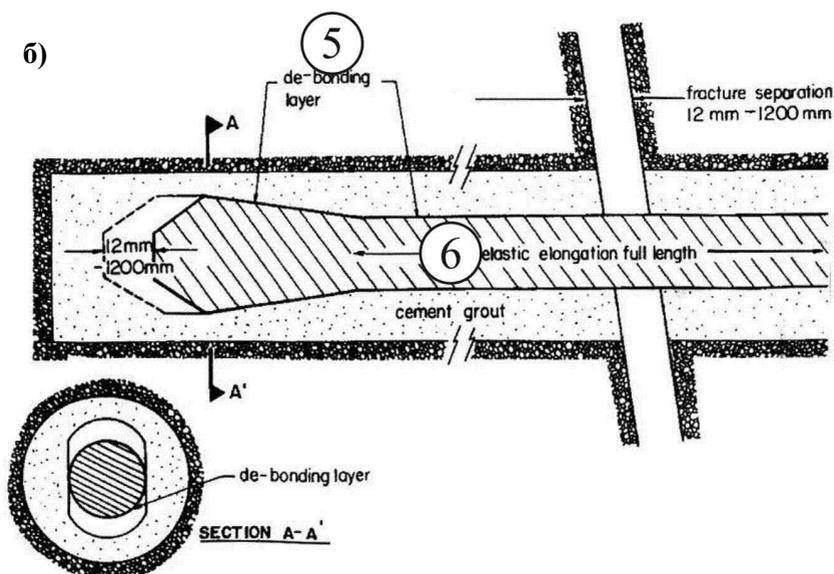


Рис. 3.22. Разрез по скважине с затампонированным жестким стержнем и с конусным болтом (окончание)

а) с затампонированным жестким стержнем.

б) с конусным болтом.

1 – трещина; 2 – удлинение стержня на 14% при разрыве; 3 – цементный тампонаж; 4 – участок отделения стержня от тампонажа; 5 – слой, отделяющий болт от тампонажа; 6 – упругое удлинение полной длины.

где E – кинетическая энергия;
 $0,5$ – постоянный коэффициент;
 m – масса породного блока.

Таким образом, наличие затампонированного стержня практически не влияет на скорость отторжения породного блока, поскольку при расчете его кинетической энергии принималась скорость равная 8 м/сек. Траектория падения блока будет аналогична показанной на рис. 3.21 а(ii), что оставляет возможность значительных повреждений.

С другой стороны, конусный болт потребляет 190кДж энергии при перемещении пород на 1 м. Энергия теряется на трении и сжатии материала цилиндрического тампонажа, ко-

гда коническая головка вытягивается из скважины. Движение отторгнутого блока задерживается полностью после перемещения на $64/190 = 0,34$ м. Общая возможность рассеивания энергии ограничивается только длиной участка скважины за разделяющей поверхностью трещины.

В дизайне крепи конкретного туннеля учитывается история внезапных выбросов, на которой могут основываться исходные данные. При строительстве на новой территории решения дизайнера реалистически оцениваются опытом соседних подземных сооружений или из литературы. Для учета динамического фактора здесь необходимо знание двух параметров – общей толщины породных плит (размеров блоков или клиньев, которые могут быть отторгнуты) и вероятной скорости отторжения. В глубоких золотоносных шахтах, например, отторжение слоя пород толщиной около 1,5 м считается наиболее интенсивным повреждением, которое может случиться при большом выбросе. Устанавливается также лимит максимального перемещения пород вовнутрь полости, допустимого прежде, чем она становится функционально непригодна.

Рис. 3.23 показывает кинетическую энергию, развивающуюся при различной толщине отторгаемой части стены, как функцию скорости отторжения.

Число и размеры податливых болтов, которые должны быть установлены на квадратный метр поверхности экскавации, чтобы ограничить перемещение пород до максимума, допустимого в каждом конкретном случае, рассчитываются методами, основанными на энергетическом подходе. Желательный уровень абсорбции энергии может быть достигнут различными сочетаниями плотности установки болтов и их диаметров. Оптимальной является комбинация, которая минимизирует число скважин, но обеспечивает расстояние между последними достаточно малое, чтобы предотвратить трещинообразование пород между болтами и прорыв обрушенных пород через оболочку сетки или канатные связи.

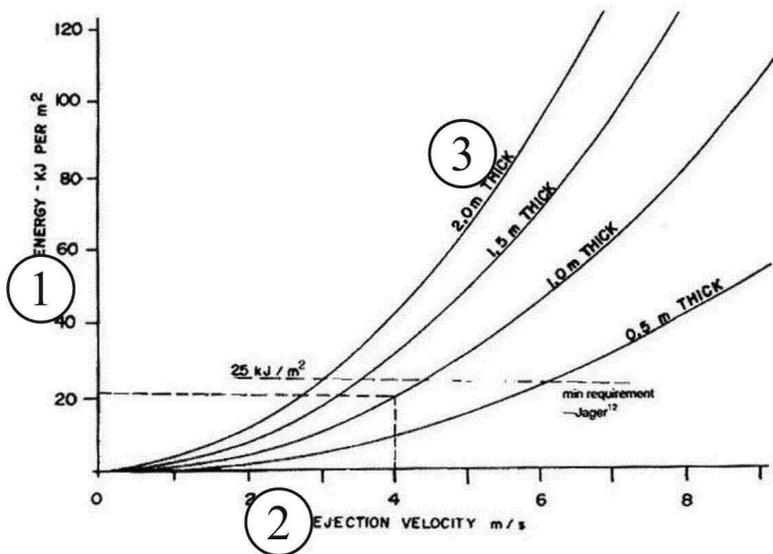


Рис. 3.23. Кинетическая энергия, развивающаяся при различной толщине отторгаемых породных плит
 1 – энергия; 2 – скорость отторжения; 3 – толщина плиты.

Предположим, что фрагмент стены толщиной 1,0 м отторгается с начальной скоростью 4 м/сек. Из рис. 3.23 видно, что на квадратном метре пострадавшей стены должна быть рассеяна энергия 20 кДж. Для туннеля, сохраняющего транспортную функцию, сдвигания стен не должны превышать, скажем, размера 0,25 м. Сила, требуемая для этого, находится из уравнения

$$F = \frac{\text{энергия}}{\text{перемещение}} = \frac{20}{0,25} = 80 \text{ кН}$$

По полученному значению выбирается диаметр конусного болта.

Следует, однако, отметить, что степень податливости, предусмотренная конструкцией конусных болтов, с увеличением глубины работ, напряженности и выбросоопасности по-

род оказалась недостаточной (рис. 3.24). Их дальнейшим развитием стали так называемые болты Split Set с продольной щелью (рис. 3.25) и Swellex с внутренней трубой (рис. 3.26, 3.27), которые усиливают породную массу комбинацией трения и механического замка. В последние несколько лет использование этих болтов быстро выросло не только в крепких, но также и слабых породах.

Болт Split Set изготавливается из трубы с продольной щелью и устанавливается под усилием в скважину, имеющую диаметр меньше диаметра болта. Подпружиненный таким образом болт расширяется в скважине, обеспечивая хорошее соединение с ее стенками.

Болт Swellex изготовлен из складчатой двухстенной трубы с закрытыми концами, через отверстие в одном из которых закачивается вода под высоким давлением, расширяющая болт. В ходе этого расширения последний прижимается к породным стенкам скважины и адаптируется к их нерегулярным формам.

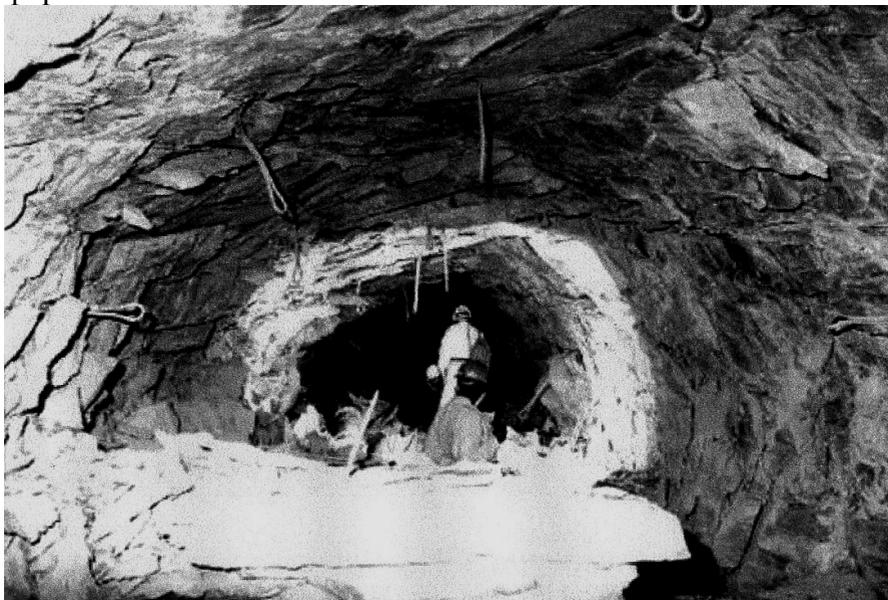


Рис. 3.24. Анкерные болты, деформированные выбросом

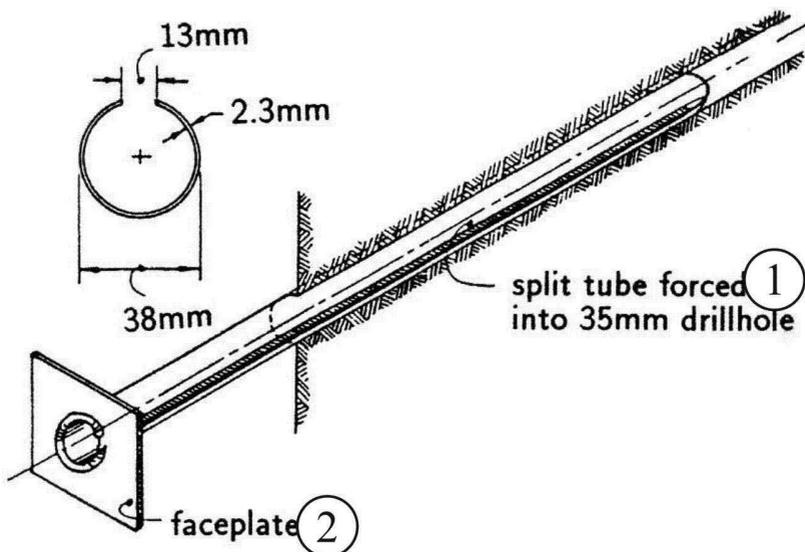


Рис. 3.25. Анкерный болт Split Set
 1 – продольная щель в трубе анкера; 2 – плита.

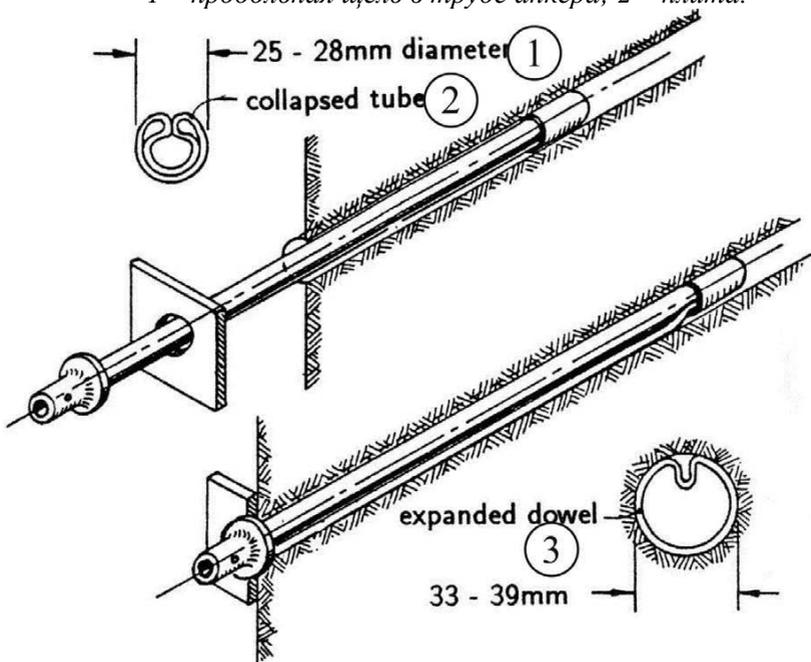


Рис. 3.26. Анкерный болт Swellex
 1 – диаметр трубы; 2 – сложенная труба; 3 – расширенная труба.

Улучшенная конструкция податливых болтов с названием Durabar предполагает, что на большей части длины стержень покрывается прочным слоем материала, отделяющего его от прилегающего тампонажного материала, а анкерование стержня достигается волнистым участком в дальнем конце скважины (рис. 3.28). Когда прикладываемая к этому участку нагрузка достигает значения, зависящего от амплитуды, длины сейсмической волны и числа синусоидальных складок, запрессованных при изготовлении стержня, сталь скользит сквозь слой тампонажа. Избыток энергии, который мог бы разрушить стержень при этом скольжении рассеивается, частично трансформируясь в тепло трения.

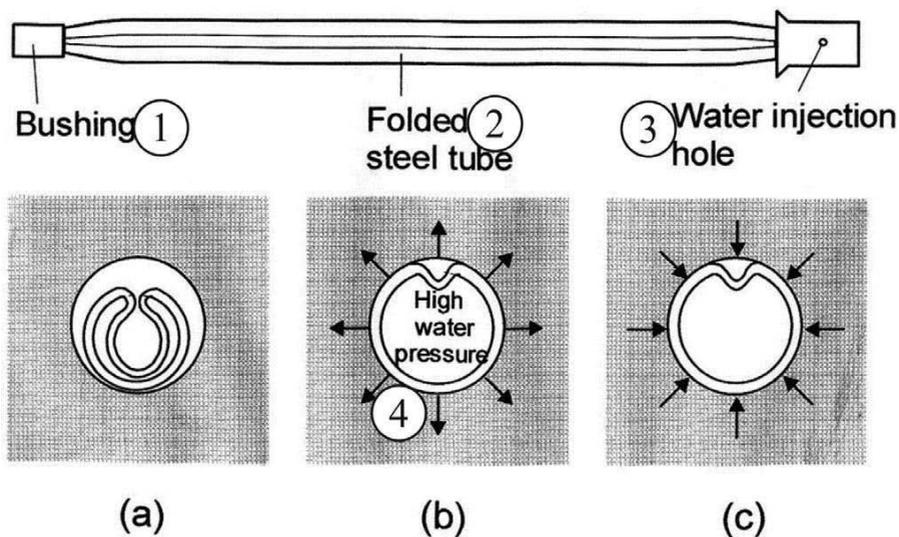


Рис. 3.27. Конструкция и принцип работы болтов Swellex

а) размещение болта в скважинах.

в) нагнетание воды.

с) болт, расширенный высоким давлением воды.

1 – втулка; 2 – сложенная труба; 3 – отверстие для инъекции воды;

4 – вода высокого давления.

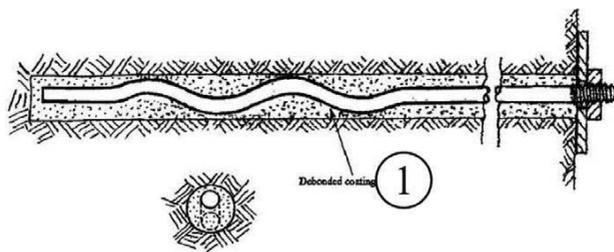


Рис. 3.28. Болт Durabar

1 – отделяющее покрытие.

Главный элемент податливых болтов Durabar – синусоидально-волнистый стальной стержень, который тампонируется в скважине и предполагает высокое, но ограниченное сопротивление вытягиванию из затвердевшего тампонажа любой деформацией окружающих пород. Волнистой формой участка стержня и слоем материала на нем, отделяющего стержень от тампонажа, связанного со стенками скважины, обеспечивается сдвиг стержня относительно скважины. Такое движение возникает, когда трещиноватость пород в ходе экскавации становится непреодолимо большой или когда импульсные сейсмические силы приводят к перемещению породных блоков и фрагментов.

Важно подчеркнуть, что податливый стержень диаметром 16 мм в начальной реакции является не намного менее жестким, чем арматурный затампонированный стержень такого же диаметра. Поэтому эффективность этих видов крепи, как жесткой системы усиления пород, одинакова, но конструкция податливых болтов позволяет им воспринимать в 10 раз большее перемещение пород, что имеет особое значение для выбросоопасных условий.

Дизайн податливых канатных анкеров основан на тех же принципах, что и болтов (рис. 3.29). Податливая деформация стали, происходящая за пределом упругости, рассеивает внешнюю энергию и оказывает контролируемое сопротивление дальнейшим деформациям и движениям пород.

Применение подобного механизма в податливых канатных анкерах встречает две проблемы. Во-первых, упругость напряженных прядей каната не позволяет сохранить волнообразную форму, созданную холодным прессованием в процессе изготовления. Во-вторых, спиральная внешняя поверхность пряди может жестко фиксироваться объемом тампонажа даже с наличием на канате слоя отделяющего материала.

Решение этих проблем потребовало, чтобы изогнутая часть каната была заключена в оболочку стального кожуха с толщиной стенки 2,5 мм. В ходе изготовления канатного анкера синусоидальные волны запрессовываются в этой части каната стальным кожухом. Деформируемый при работе анкера кожух имеет достаточную жесткость, чтобы удержать изогнутую форму и обеспечить таким образом анкерование каната в скважине.

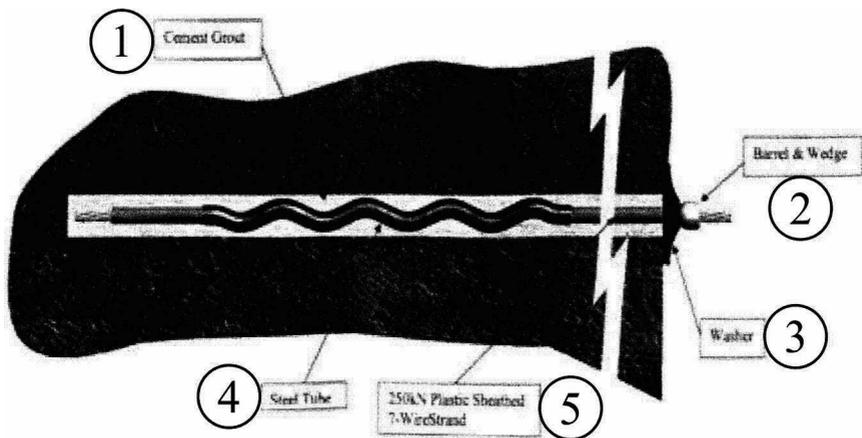


Рис. 3.29 Схема размещения болта Durabar в скважине
 1 – цементный тампонаж; 2 – натяжная гайка; 3 – плита; 4 – изогнутая часть стержня; 5 – прямая часть стержня.

Наличие стального кожуха имеет также дополнительное преимущество, позволяя нанести слой смазки между фиксированной внутренней поверхностью кожуха и скользящей по-

верхностью канатных прядей, что создает постоянное значение статической податливости сопротивления.

После установки деформированный взятый в кожух канат анкеруется в дальнем конце скважины, оставляя «свободным» ее незатампонируемый участок. Чаще, однако, скважина тампонируется на полную длину при условии покрытия кожуха слоем материала, отделяющего его от тампонажа.

3.3.3 Усовершенствование технологии применения набрызгбетона

Применение набрызгбетона в качестве крепи подземных полостей, в том числе, вскрывающих и подготовительных выработок шахт позволило решить многие проблемы, связанные с необходимостью своевременной установки крепи вслед за продвижением забоев и необычными условиями горного давления на большой глубине. Механизм работы набрызгбетона показан на рис. 3.30. Обычная практика его применения предусматривает совместную работу с металлической сеткой (рис. 3.31). Однако, работа набрызгбетонной крепи в выброоопасных условиях (рис. 3.32, 3.33) потребовала усовершенствования качества материала, в частности, за счет включения в раствор армирующих элементов – мелких металлических стержней (рис. 3.34) (см. книгу авторов «Подземное строительство в нестабильных условиях», «Норд-Пресс», Донецк, 2008).

Использование таких армирующих элементов позволило во многих случаях применения набрызгбетона исключить металлическую сетку, которая служила основой для нанесения слоя набрызгбетона и усиливала его. Однако, фиксирование стен полостей сеткой было трудоемким и продолжительным процессом, дорогостоящим и иногда опасным.

По сравнению с сеткой, применение усиливающих стержней позволяет набрызгбетонной крепи точно следовать очертаниям стен, тогда как даже в регулярной поверхности

A

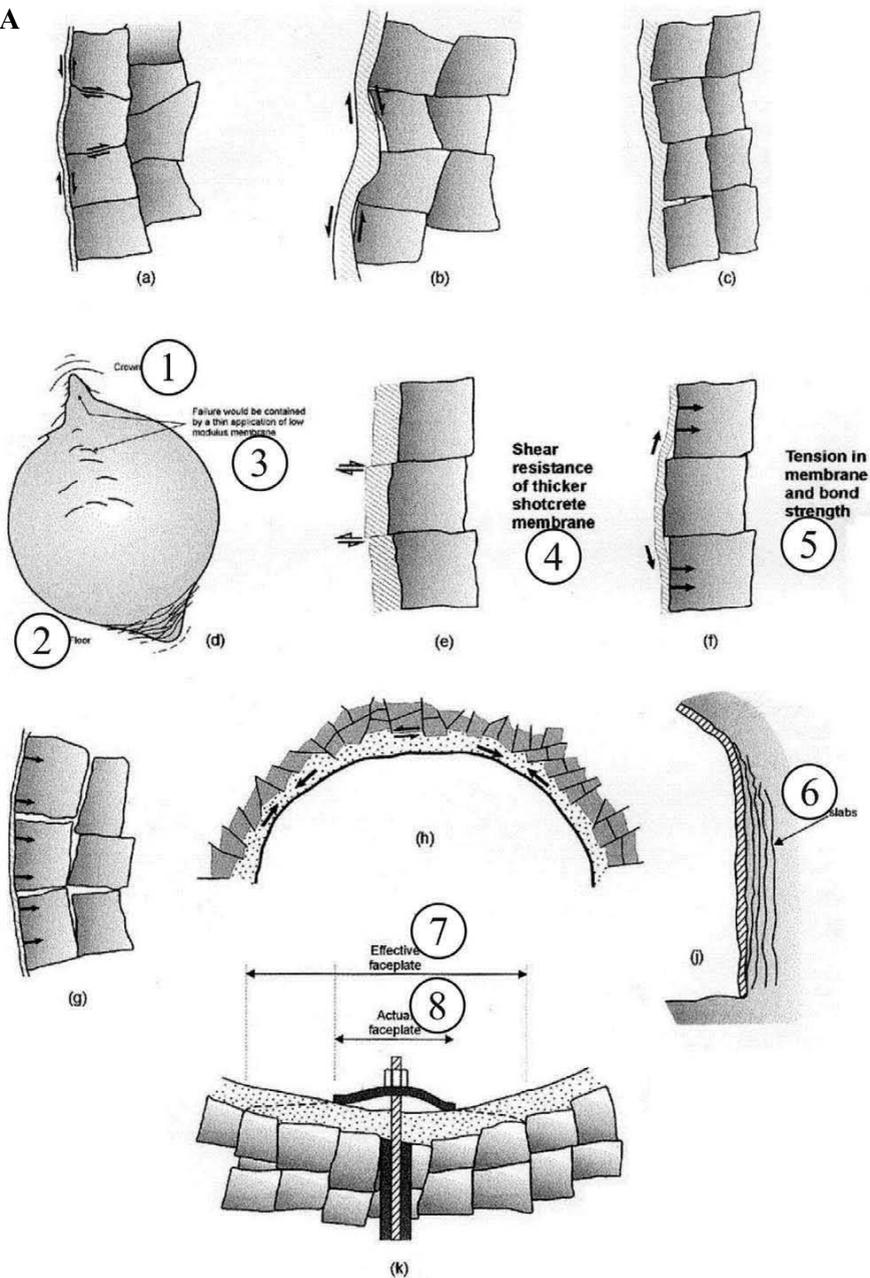


Рис. 3.30. Механизм работы набрызгбетона

B

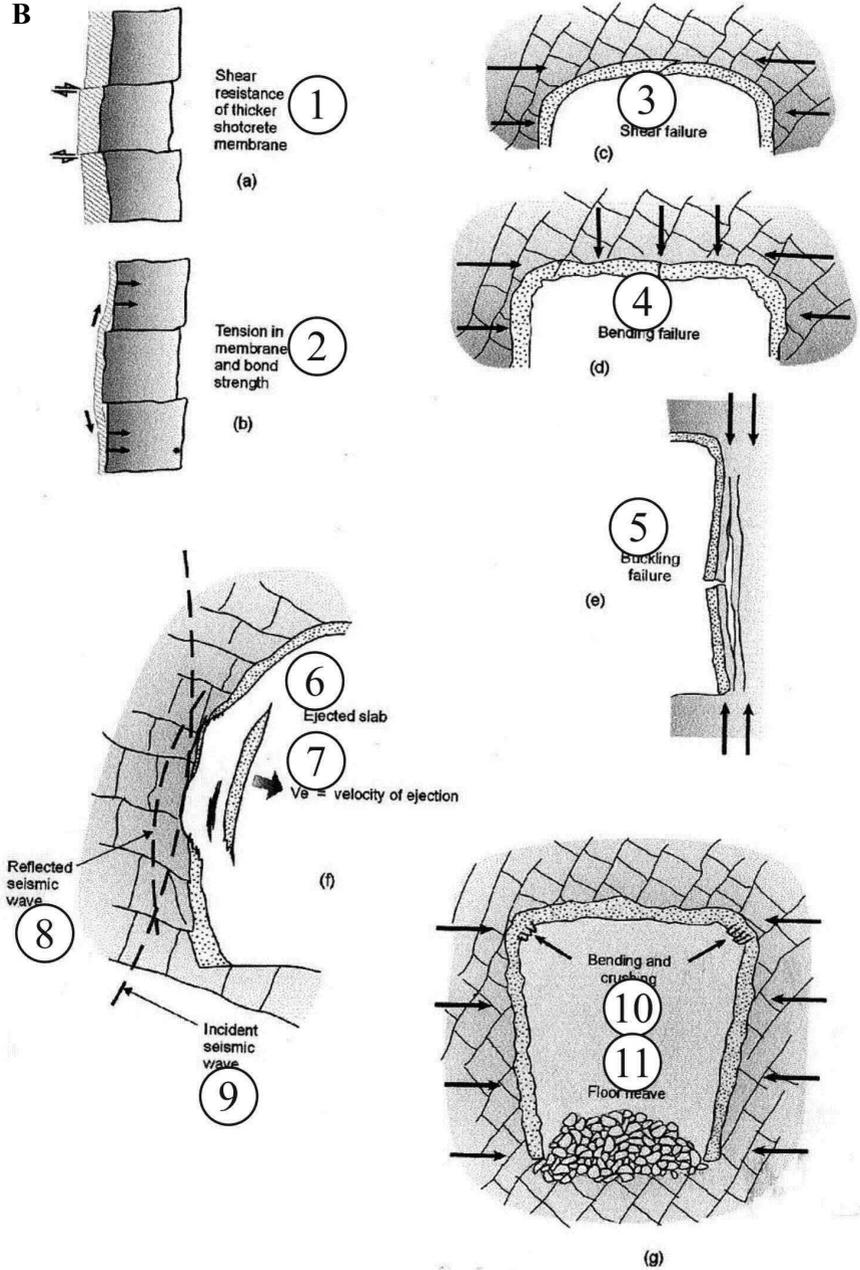


Рис. 3.30. Механизм работы набрызгбетона (окончание)

Объяснения к рис. 3.30:

A – механизм поведения набрызгбетонной крепи.

а) связь набрызгбетона с породой, прочность набрызгбетона на растяжение, предотвращение среза по линии воздействия, ограничение вращения блоков; в) усиление прочности среза на границе между набрызгбетоном и породой, как результат шероховатой поверхности этой границы; с) проникновение материала набрызгбетона в сочленения и трещины; d) предотвращение движения блоков, в частности, вызванное ситуацией очень высоких напряжений, при которой будут иметь место некоторое ослабление и трещиноватость; e) предотвращение перемещения блоков прочностью набрызгбетона на срез; f) предотвращение перемещения блоков прочностью бетона на растяжение; g) создание воздухо непроницаемости для предотвращения обрушения породных масс из-за входа воздуха в раскрытые сочленения и трещины; h) создание структурной арки в кровле, противостоящей дальнейшей деформации породных масс; j) увеличение сопротивления прогибу породных плит; к) расширение площади влияния анкерных болтов и плит на удержание породных масс;

1 – кровля; 2 – почва; 3 – обрушение может сдерживаться применением тонкой мембраны; 4 – сопротивление срезу мембраной набрызгбетона большой толщины; 5 – напряжение в мембране и прочность связи; 6 - породные плиты; 7 – расширенная опорная плита; 8 – фактическая опорная плита.

B – механизм нагрузки набрызгбетонной крепи.

а) в набрызгбетоне индуцируются напряжения срезу вдоль периметра породного блока; в) при разрыве связи механизм статический или динамический имеет тенденцию к локализации или точечной нагрузке; с) механизм разрушения набрызгбетона при срезе; d) механизм разрушения набрызгбетона при сгибе; e) механизм разрушения набрызгбетона при прогибе; f) расслоение набрызгбетона; g) при отсутствии крепи почвы ее большая, чем кровля конвергенция, приводит к изгибающим нагрузкам на набрызгбетон, особенно в пятах свода;

1 – сопротивление срезу мембраной набрызгбетона большей толщины; 2 – расслоения в мембране и прочность связи; 3 – разрушение при срезе; 4 – разрушение при сгибе; 5 – разрушение при прогибе; 6 – отторгнутая плита; 7 – скорость отторжения; 8 – отраженная сейсмическая волна; 9 – воздействие сейсмических волн; 10 – изгиб и разрушение; 11 – подъем почвы.

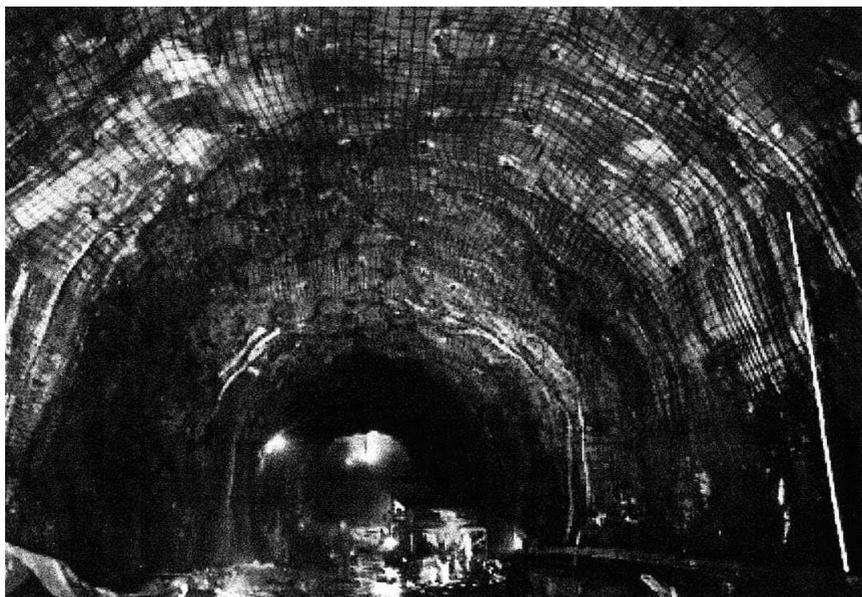


Рис. 3.31. Металлическая сетка в туннеле

экскавации сетка прикрепляется, главным образом, к точкам, служащим проекциями поверхности (рис. 3.35 а).

Набрызгбетон, усиленный сеткой, должен иметь толщину 30-35 мм, а также заполнять все пустоты за ней, что требует дополнительного расхода раствора. Нанесение последнего на сетку приводит к его более сильному отскоку, чем от породной стены, ухудшая качество крепи и создавая условия для дренирования воды в туннель. Вибрация сетки при ударе набрызгбетона уменьшает его связь с породами, хотя это – очень важное качество эффективной работы крепи.

Строительство туннелей в выбросоопасных условиях приводит к трещинообразованию и часто – к большому смещению пород. Породные массы разделяются на фрагменты, которые отторгаются от стен и кровли с большой скоростью. В таких условиях, как уже отмечалось, крепь должна иметь способность абсорбировать энергию и обладать степенью податливости, достаточной для перемещения пород.

а)



б)



Рис. 3.32. Разрушение набрызгбетонной крепи при внезапном выбросе в туннеле

а) при пересечении туннеля с нарушением, магнитуда события – 4,0, глубина 1540 м; б) при событии с магнитудой 1,8 на глубине 3200 м.

a)



Рис. 3.33. Повреждения в туннеле, вызванные внезапным выбросом

б)



Рис. 3.33. Повреждения в туннеле, вызванные внезапным выбросом (окончание)

Объяснения к рис. 3.33:

а) изучение источника выброса;

б) обследование возможности прохода людей в поврежденной зоне.

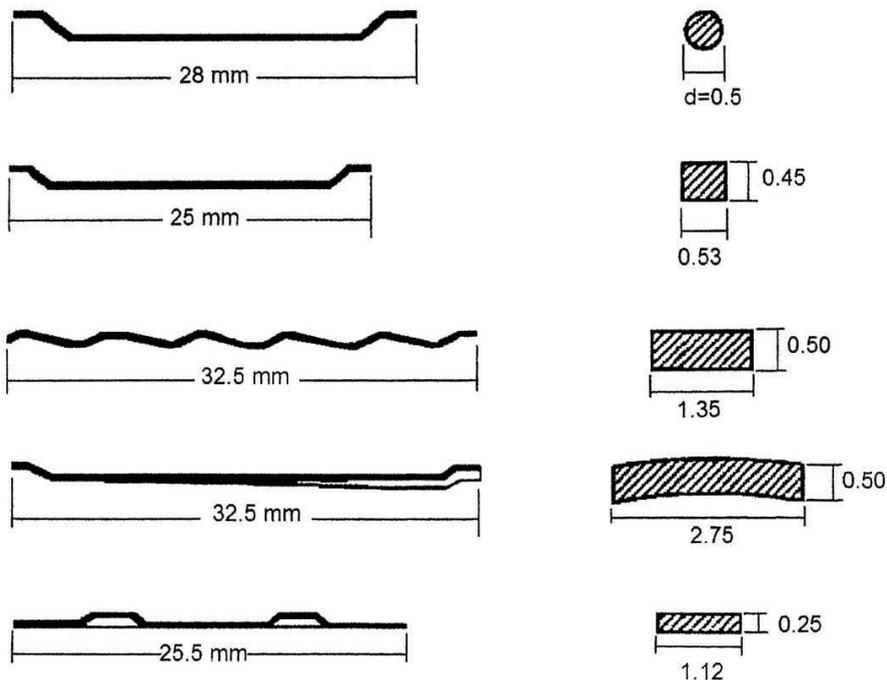
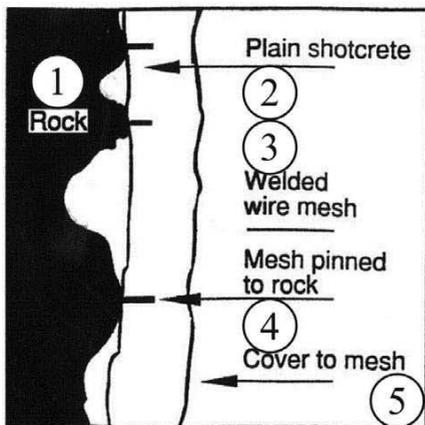


Рис. 3.34. Армирующие элементы набрызгбетона

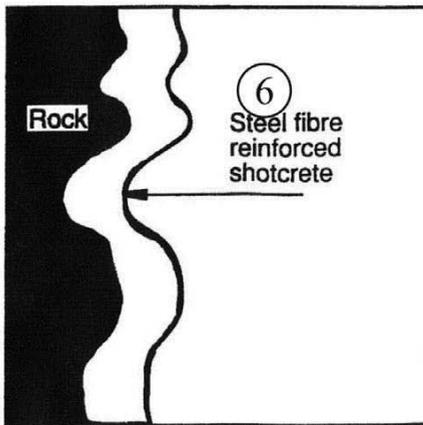
На рис.3.35б показано создание зазоров податливости в набрызгбетонной крепи. Другим решением для этого служит упомянутое выше армирование набрызгбетона стержнями равномерно распределенными и ориентированными во всех направлениях.

По сравнению с обычным набрызгбетоном, который более хрупок, армированный набрызгбетон показывает податливое поведение и способность абсорбировать значительное количество энергии в ходе серьезных деформаций. Армированный набрызгбетон становится частью общей системы крепи, если в нее входят также податливые болты.

a) MESH REINFORCED SHOTCRETE



b) STEEL FIBRE REINFORCED SHOTCRETE



b) YIELDING ROCK BOLTS

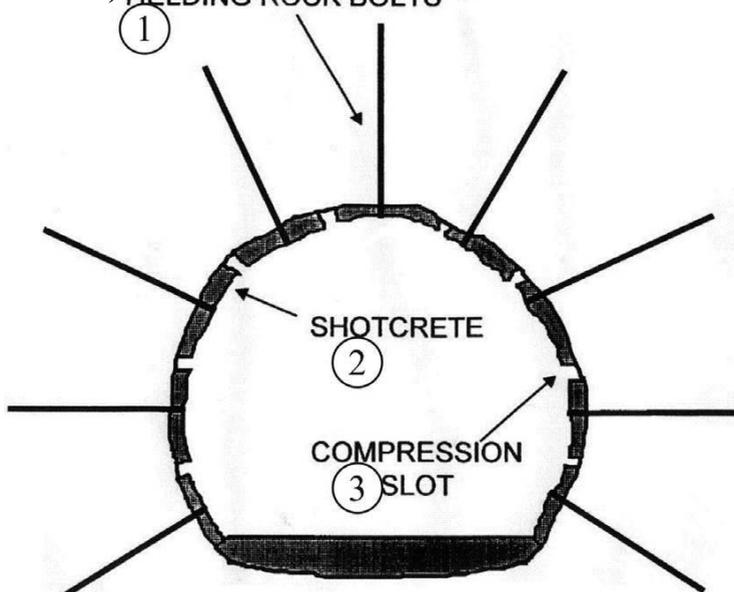


Рис. 3.35. Сравнение набрызгбетона, применяемого с металлической сеткой и армированного набрызгбетона, обеспечение податливости набрызгбетонной крепи

Объяснения к рис. 3.35:

а) набрызгбетон с металлической сеткой.

б) армированный набрызгбетон.

1 – порода; 2 – обычный (неармированный) набрызгбетон; 3 – сваренная сетка; 4 – места прикрепления сетки к породе; 5 – покрытие сетки набрызгбетоном; 6 – армированный набрызгбетон.

в) обеспечение податливости набрызгбетонной крепи.

1 – податливые болты; 2 – набрызгбетон; 3 – цель податливости.

Сравнительная характеристика деформационной способности набрызгбетона с металлической сеткой и армированного набрызгбетона показана на рис. 3.36.

Еще одно усовершенствование набрызгбетонной крепи достигнуто применением микроцементов, составляющих в смеси до 10% общего веса цемента, и полимерных добавок, которые позволили улучшить прочность набрызгбетонной крепи, применять ее на влажных поверхностях, сократить срок схватывания.

Теоретический анализ применения и параметров набрызгбетона усложняется:

- комплексным взаимодействием между разгружающимися породными массами вокруг подземной полости и слоем набрызгбетона варьируемой толщины;
- изменением темпов схватывания цементной массы с помощью микроцементов и полимерных добавок;
- совместной работой с другими элементами крепи – болтами, канатными анкерами, стальной комплектной крепью (например, арочной).

Перечисленные факторы требуют старательного изучения практического опыта применения набрызгбетона в широком разнообразии геологических, в частности, выбросоопасных условий.

В табл. 3.2 суммированы характеристики различных систем крепи и их функции.

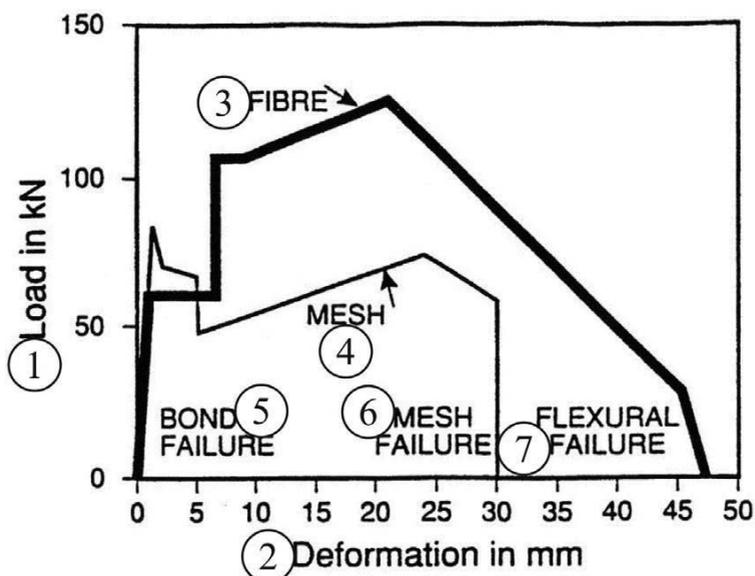


Рис. 3.36. Сравнительная характеристика деформационной способности набрызгбетона с металлической сеткой и армированного набрызгбетона

1 – нагрузка; 2 – деформация; 3 – армированный набрызгбетон; 4 – металлическая сетка; 5 – разрушение связи; 6 – разрыв сетки; 7 – разрушение изгибом.

Таблица 3.2 – Характеристика и функции систем крепи

Характеристика крепи	Функции крепи		
	усиление	удержание	стабилизация
жесткость	тампонируемый арматурный стержень	набрызгбетон	тампонируемый арматурный стержень
гибкость	канатный анкер	сетка	длинные механические болты
прочность	канатный анкер	армированный набрызгбетон	канатный анкер
хрупкость	тампонируемый арматурный стержень	набрызгбетон	тампонируемый арматурный стержень
податливость	конический болт	сетка «рабица»	болты Split Set и Swellex

В табл. 3.3 в качестве примера показана характеристика элементов крепи, применяемой в Канаде.

На рис. 3.37 изображены два соседних участка выработки туннельного типа в рудной шахте, которые подверглись внезапным большим динамическим нагрузкам из-за взрывных работ и сейсмичности, вызванной добычей руды. На рис. 3.37а показан участок туннеля, где была установлена традиционная жесткая крепь, не имеющая элементов податливости, что при динамических нагрузках привело к разрушению жестких стержней и набрызгбетона. На рис. 3.37б показана податливая система крепи, в которой наблюдались только малые повреждения: были разрушены несколько плит под болтами, несмотря на значительные (12-18 см) смещения стен.

Таблица 3.3 – Характеристика элементов крепи, применяемой в Канаде

Описание	Пиковая нагрузка, кN	Предельное перемещение, мм	Абсорбируемая энергия, кJ
Арматурный стержень с полимерным тампоном (19 мм)	120-170	10-30	1-4
Канатный анкер (16мм)	160-240	20-40	2-6
Механический болт длиной 2 м (16 мм)	70-120	20-50	2-4
Канатный анкер длиной 2 м (16 мм)	160-240	30-50	4-8
Тампонируемый гладкий стержень (16 мм)	50-100	80-200	5-15
Податливый болт Swellex	80-90	100-150	8-12
Конусный болт (16 мм)	90-140	100-200	10-25
Сваренная сетка	24-42	125-225	2-6/м ²
Сетка «рабица»	32-38	350-450	3-10/м ²
Набрызгбетон и сетка	2-х сетка	100-150	(3 – 5) ^x сетка

3.3.4 Применение разгрузочного взрывания

Концепция разгрузочного взрывания развилась из наблюдений, что зона высоко трещиноватых пород, непосредственно окружающих подземную полость на большой глубине, создает некоторую податливую область, защищающую полость от возникновения и последствий выбросов (рис. 3.38). Основная идея, положенная в основу разгрузочного взрывания – правильно выбранный дизайн взрывных работ в ограниченной зоне, позволяет передать напряжения, индуцированные горными работами, прилегающему породному массиву.

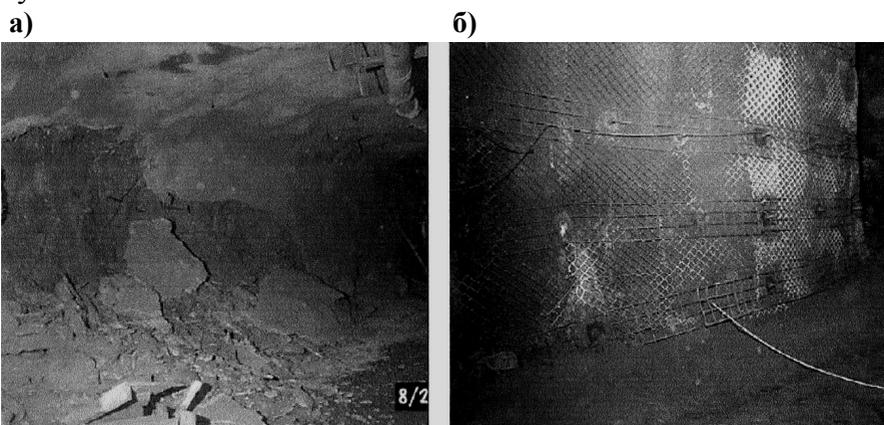


Рис. 3.37. Участки туннеля с жесткой и податливой крепью
а) с жесткой крепью; б) с податливой крепью.

Существует два пути выполнения разгрузочного взрывания. Первая альтернатива – взрывать с наиболее возможной силой без большого ущерба для экскавации. Идея заключается в ослаблении определенной зоны массива созданием максимально густой системы микротрещин. Такое ослабление приводит к изменению механической реакции породного массива и характера его деформаций от упругих к пластическим. Второй подход к созданию разгрузки не вызывает формиро-

вания каких-либо новых трещин перед забоем, но вместо этого ведет к проскальзыванию массива вдоль существующих породных трещин из-за высокого давления взрывных газов. Трещиноватые породные массы в результате разгрузочного взрывания формируют «защитную подушку» перед забоем. Если сейсмические события происходят на некотором расстоянии от разгруженного забоя, волна динамического растяжения от этого события не вызовет такого объема повреждений, как в неразгруженном забое.

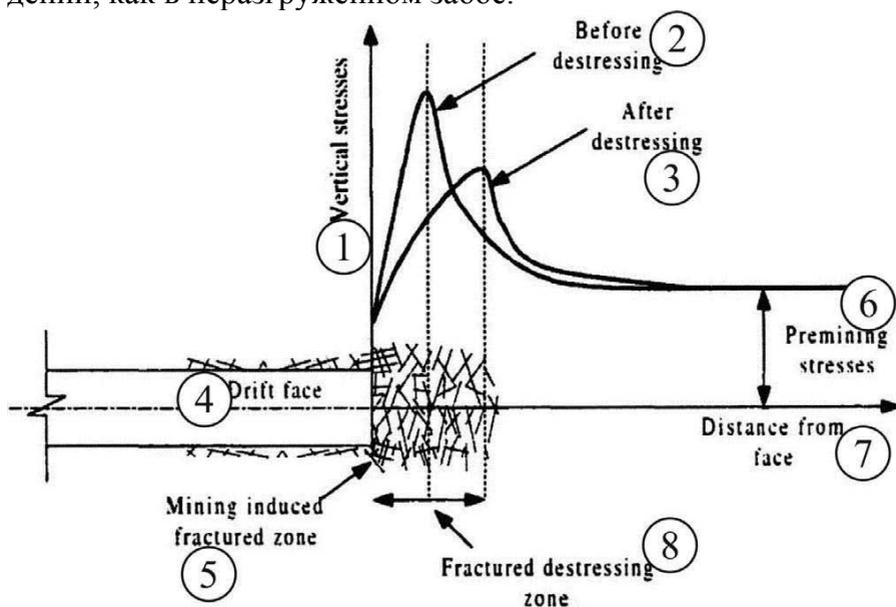


Рис. 3.38. Профиль напряжений, опережающих разгруженный забой штрека

1 – вертикальные напряжения; 2 – перед разгрузкой; 3 – после разгрузки; 4 – забой штрека; 5 – зона трещиноватости, индуцированной горными работами; 6 – напряжения массива перед штреком; 7 – расстояние от забоя; 8 – разгруженная трещиноватая зона.

Следует, однако, иметь ввиду, что проведение разгрузочного взрывания, например, в добычном забое не защищает его от появления повторных напряжений, вызванных соседними горными работами. Такой случай произошел на шахте

Western Deep Levels South Mine, Южная Африка, когда работы в предварительно разгруженном уступе Е были остановлены в то время, как они продолжались в соседних уступах С и F. Двумя неделями позднее в уступе Е произошло сейсмическое событие с магнитудой 1,1, вызвавшее выброс в забое и разрушение крепи.

Применение разгрузки в забоях вскрывающих и подготовительных выработок часто бывает успешным и многие горнодобывающие компании разработали собственные стандарты бурения, зарядания и взрывания. Разгрузка целиков более трудна, поскольку эффективность взрывов изучена недостаточно. Как и в случае с близко расположенными добычными уступами, разгрузка одного целика также передает напряжения на соседние, которые, в свою очередь, могут стать высоконапряженными.

Разгрузочное взрывание оказалось одним из лучших способов управления выбросами. Однако, оно имело смешанный результат применения, главным образом, из-за следующих факторов:

- в мировой литературе существует обильная информация по этой теме, однако, она разбросана и нелегко доступна горным инженерам-практикам в приемлемой форме;
- хотя принципы разгрузочного взрывания хорошо поняты, его успешному применению препятствует недостаток научного инструментария, позволяющего правильно отразить конкретные условия шахты и оценить обстановку до и после разгрузочного взрывания;
- при неудовлетворительном дизайне разгрузочное взрывание может превысить допустимый уровень затрат из-за излишнего бурения скважин, расхода взрывчатого вещества и затрат времени на операции, прерывающие процесс добычных работ.

Кроме уменьшения напряжений в какой-либо шахтной структуре, успешное разгрузочное взрывание изменяет поведение хрупких породных масс с упругого на податливое пла-

стичное. Таким образом, разгрузочное взрывание не только уменьшает напряжения в зоне работ, но и способствует созданию пластичной «рубашки» вокруг подземной полости. Разгрузочное взрывание может быть оценено, как тактическая мера управления напряженными выбросами во всех горных туннелях, которые приводят к созданию высоких напряжений в массиве крепких хрупких пород на контурах подземных полостей. На рис. 3.39 показаны ситуации, где разгрузочное взрывание позволяет управлять внезапными выбросами или даже устранять их.

В последние годы оптимальный дизайн разгрузочного взрывания определяется цифровым моделированием с помощью метода конечных элементов. Создано шесть различных моделей, в которых рассматривается разгрузочное взрывание, начиная от исходного состояния до результатов. Этот метод используется для энергетического подхода к расчету напряжений, вызванных горными работами. Такая технология была применена, в частности, в шахте Campbell Red Lake, Ontario, Канада.

Для шахт Южной Африки, разрабатывающих субгоризонтальные (пологие) глубокие месторождения, оценивались две схемы бурения разгрузочных скважин – параллельно и перпендикулярно подвигающемуся забою. Была обнаружена важность правильной забойки, которая трудно выполнялась в коротких перпендикулярных забою скважинах. Мониторинг результатов включал конвергенцию и горизонтальные перемещения пород, расположение сейсмических событий. Для анализа собранных данных использовалось компьютерное моделирование.

После разгрузочного взрывания новые трещиноватые плоскости не образовывались. Перемещения породных слоев по существующим геологическим плоскостям привели к появлению разрушений различного объема. Механизм разгрузки проявился в сотрясении существующих напряженных (нару-

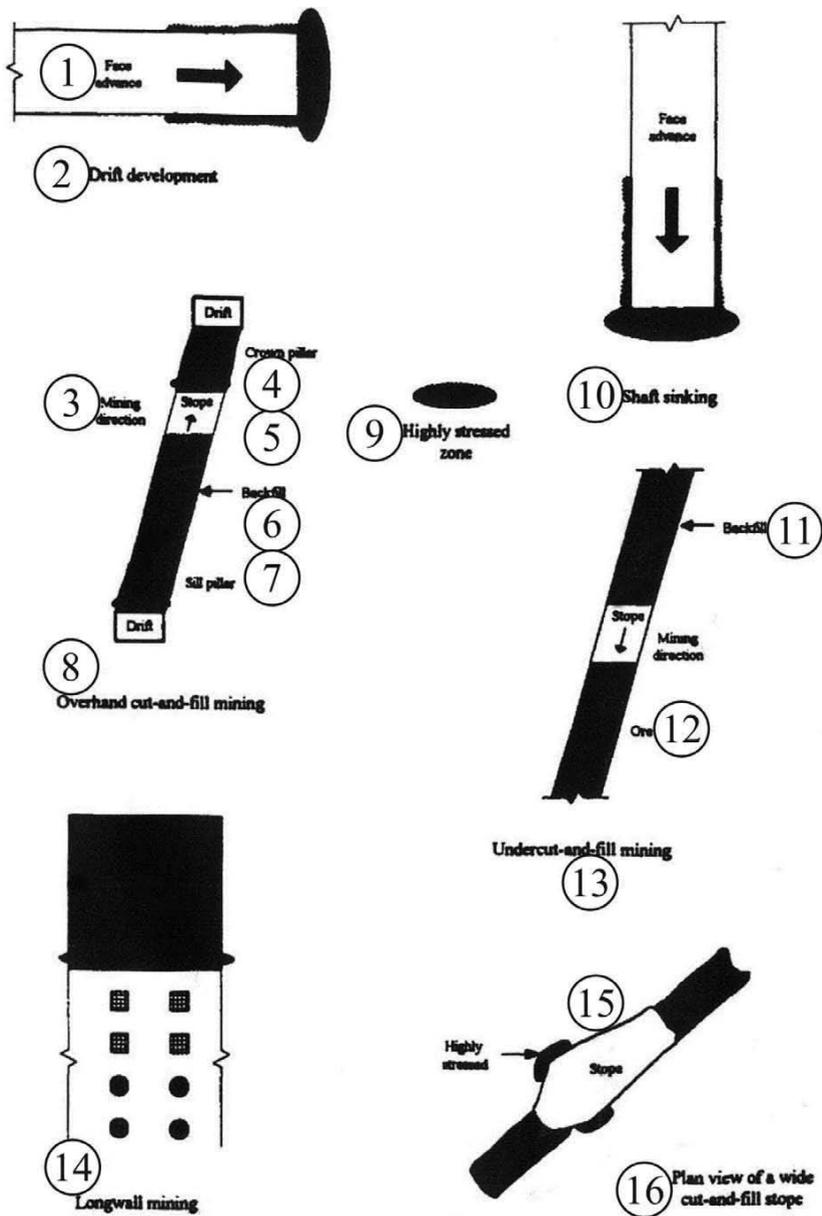


Рис. 3.39. Некоторые горные ситуации, требующие проведения разгрузочного взрывания

Объяснения к рис. 3.39:

1 – подвигание забоя; 2 – проведение штрека; 3 – направление работ; 4 – целик в кровле; 5 – уступ; 6 – закладка; 7 – опорный целик в почве; 8 – восстающая отработка с закладкой выработанного пространства; 9 – высоко напряженная зона; 10 – проходка ствола; 11 – закладка; 12 – руда; 13 – нисходящая отработка с закладкой выработанного пространства; 14 – длиннозабойная система разработки; 15 – уступ; 16 – план широкого уступа с закладкой выработанного пространства.

шенных) зон, уменьшении нормальных напряжений, сжимающих эти зоны и, следовательно, снижении сопротивления срезу, что приводило к скольжению массива. Разгрузочное взрывание заставляло эти явления, вызывающие сейсмические события, мигрировать от забоя в глубину массива.

Было, однако, замечено, что большая задержка в возобновлении добычных работ после разгрузочного взрывания позволяет напряжениям восстановиться в разгруженном массиве за счет консолидации трещин.

Далее приводятся несколько конкретных примеров успешного применения разгрузочного взрывания на шахтах мира.

В шахте Macassa, Ontario, Канада (рис. 3.40) разгрузочное взрывание испытывали в уступе крутонаклонного рудного тела, где линия скважин располагалась в средней плоскости забоя. Это делалось после отработки уступа примерно на 60%. Измерения показали, что вертикальные напряжения равны давлению покрывающих пород с градиентом 0,026 МПа/м, максимальные и минимальные горизонтальные напряжения составляют соответственно 1,62 и 1,14 величины вертикальных. Напряжения оказались столь высоки, что некоторые скважины было невозможно зарядить взрывчаткой. До взрывания и после него регистрировались сейсмические события и конвергенция. Процесс моделировался компьютерными программами.

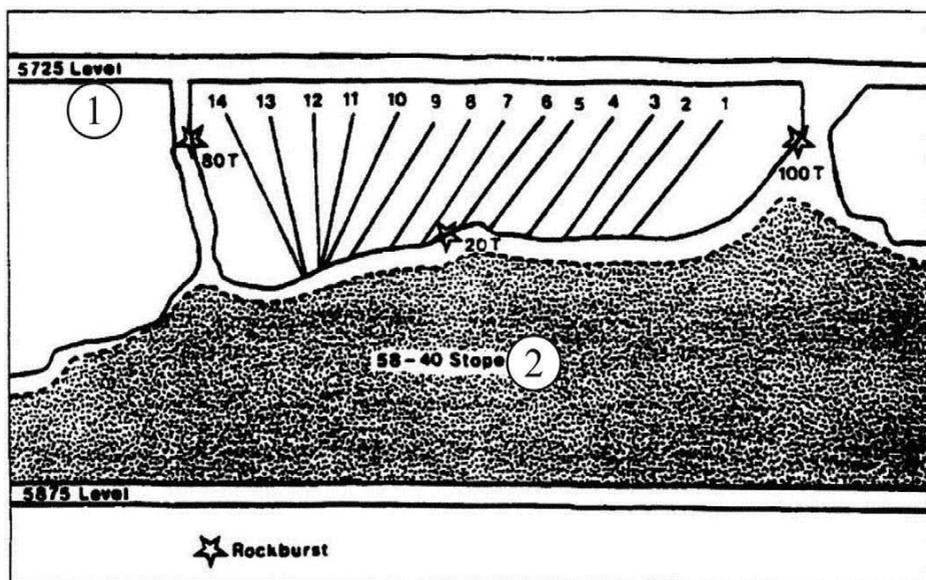


Рис. 3.40. Разгрузочное взрывание в шахте Macassa
 1 – горизонт 5725; 2 – уступ 58-40.

В шахте Campbell, Ontario, Канада скважины бурились диаметром 45 мм с расстоянием между центрами 1,4 м и заряжаемой частью 1,5 м. Удельный расход взрывчатого вещества составил $0,7 \text{ кг/м}^3$, тогда как в продуктивных скважинах он равнялся $2,1 \text{ кг/м}^3$ (рис. 3.41).

В шахте Pyhasalmi, Финляндия (рис. 3.42) в первых двух испытаниях разгрузочное взрывание осуществлялось в центральной плоскости целика с размерами 10×5 м между горизонтами 645 м и 660 м. Здесь скважины бурились диаметром 89 мм, длиной 10 м с интервалами 0,8 м. В третьем испытании, проводившемся между горизонтами 615 и 630 м, бурились скважины диаметром 64 мм длиной около 11 м с интервалами 0,5 м.

Результаты испытаний оказались неоднозначными, но обещающими.

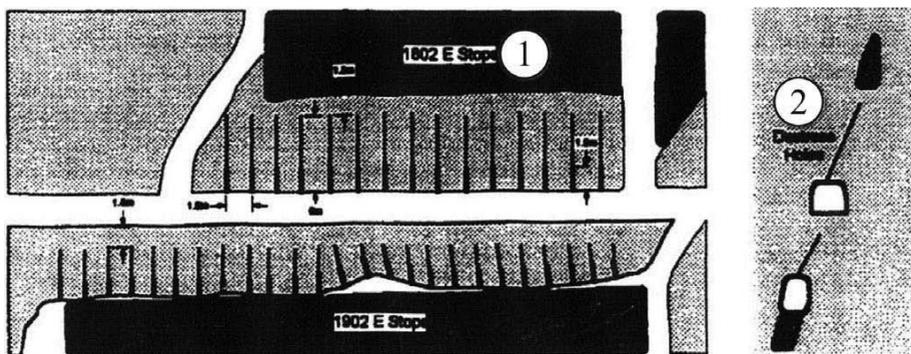


Рис. 3.41. Разгрузочное взрывание в шахте Campbell
 1 – уступ 1802; 2 – разгрузочная скважина.

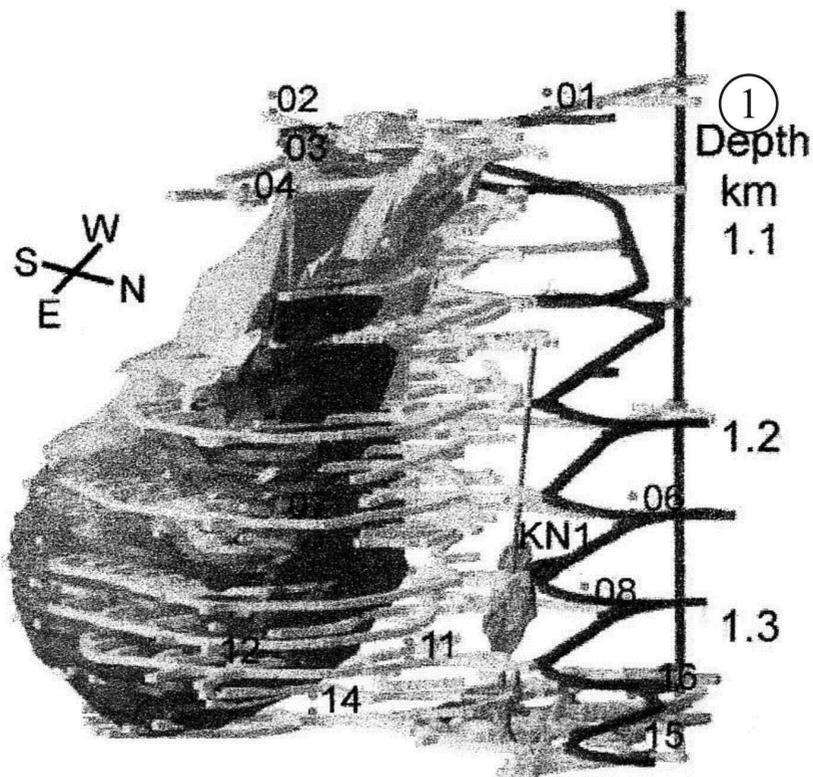


Рис. 3.42. Схема вскрытия рудного тела шахты Рuyasalmi

l – глубина.

Схема работ по разгрузочному взрыванию на шахтах компании East Proprietary Mines, Южная Африка показана на рис. 3.43. Здесь бурение и взрывание разгрузочных скважин входило в производственный цикл. Каждый добычной уступ имел максимальную длину 20 м. Скважины диаметром 38 мм располагались параллельно плоскости рудного тела вдоль его контакта с лежащим боком массива. Скважины имели диаметр 89 мм, опережали забой на 3,5-5,5 м и бурились из опережающего уступа. Если они отдалялись от забоя, их бурение усложнялось высокими напряжениями.

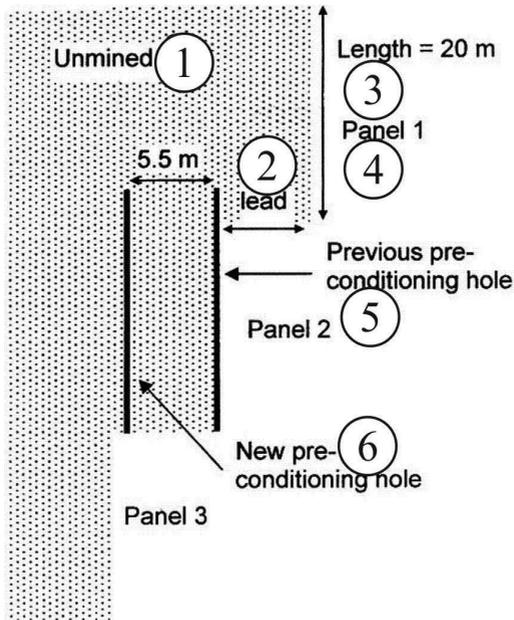


Рис. 3.43. Расположение разгрузочных скважин при восходящем порядке отработки на шахтах компании East Rand Proprietary Mines

1 – неотработанный участок; *2* – ширина забоя; *3* – длина; *4* – панель (уступ); *5* – ранее пробуренная скважина; *6* – новая пробуренная скважина.

На рис. 3.44 показана схема бурения разгрузочных скважин диаметром 38 мм перпендикулярно к забою. Скважины нового цикла бурились на расстоянии 0,5 м от скважин предыдущего цикла, чтобы избежать попадания новых скважин в невзорванное дно старых. Каждый продуктивный взрыв подвигал забой примерно на 1 м. Расстояние между скважинами не превышало 3 м, радиус воздействия каждой из них равнялся примерно 1,5 м. Испытания показали также целесообразность диаметра скважин 36-40 мм. Скважины бурились по середине высоты забоя, с тем, чтобы уменьшить риск их пересечения с продуктивными скважинами. Глубина заряда составляла 2,0 м, забойки 1,0 м.

На рис. 3.45 показаны скважины, параллельные забою шахты Lebanon Gold Mine, штат Pennsylvania, США.

Применение обоих описанных методов на шахтах East Rand Proprietary позволило уменьшить число выбросов в забое и улучшить рабочие условия. Ускорились также бурение продуктивных скважин, поскольку после разгрузочного взрывания они располагались в трещиноватых породах.

Разгрузочное взрывание на этих шахтах проводилось в 32 забоях в течение 19 месяцев. Количество выбросов, тяжесть их последствий, время выбросов (по отношению к смене) и несчастные случаи регистрировались мониторингом до и после разгрузочного взрывания. Число выбросов уменьшилось на 34%, а несчастные случаи прекратились вообще.

Позднее разгрузочное взрывание распространилось на шахты других компаний. На рис. 3.46 показаны две наиболее широко применявшиеся схемы с бурением скважин перпендикулярно и параллельно забою.

На шахте Blyvooruitzicht, Южная Африка также применялись обе схемы бурения разгрузочных скважин – параллельно и перпендикулярно добычному забою (рис. 3.47). Последняя схема осложнялась трудностью выполнения правильной забойки коротких субгоризонтальных скважин. Мониторинг результатов включал конвергенцию и горизонтальное

перемещение пород, локализацию сейсмических событий, томографию и геофизический контроль. Для анализа собранных данных использовалось компьютерное моделирование.

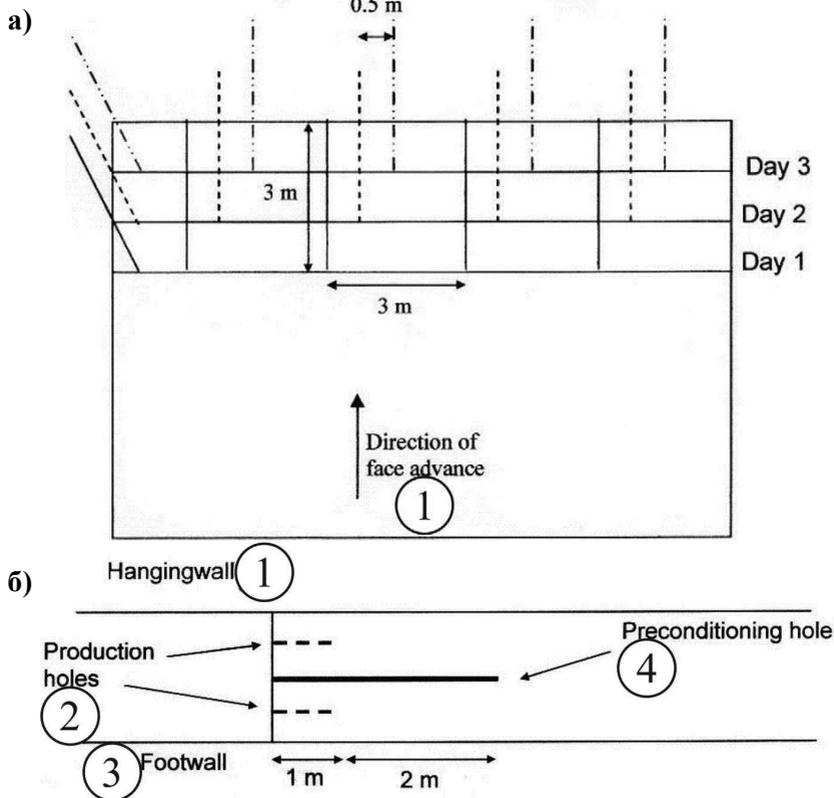


Рис. 3.44. Разгрузочные скважины, перпендикулярные забою

а) план;

1 – направление подвигания забоя.

б) разрез;

1 – висячий бок массива; 2 – продуктивные скважины; 3 – лежащий бок массива; 4 – разгрузочная скважина.

После разгрузочного взрывания новые плоскости трещиноватости не обнаруживались. Перемещения породных слоев по существующим геологическим поверхностям – трещинам и напластованиям – проявлялось, как их заполнение раздроб-

ленным материалом. Разгрузочный механизм объяснялся сотрясениями существующих плоскостей напряжения, вызывающими скольжение массива при срезе выступов шероховатых поверхностей, а также проникновение взрывного газа в эти плоскости, что уменьшало воздействие нормальных напряжений и сопротивление срезу. Сейсмические события при разгрузке перемещались от разгруженной площади вглубь массива.

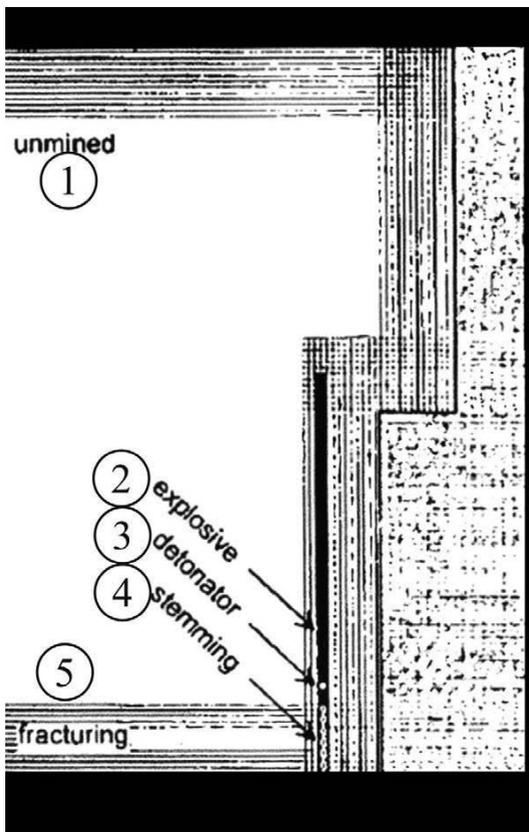


Рис. 3.45. Разгрузочные скважины, параллельные забою (шахта Lebanon Gold Mine)

*1 – неотработанная руда; 2 – взрывчатое вещество;
3 - детонатор; 4 – забойка; 5 - трещиноватость*

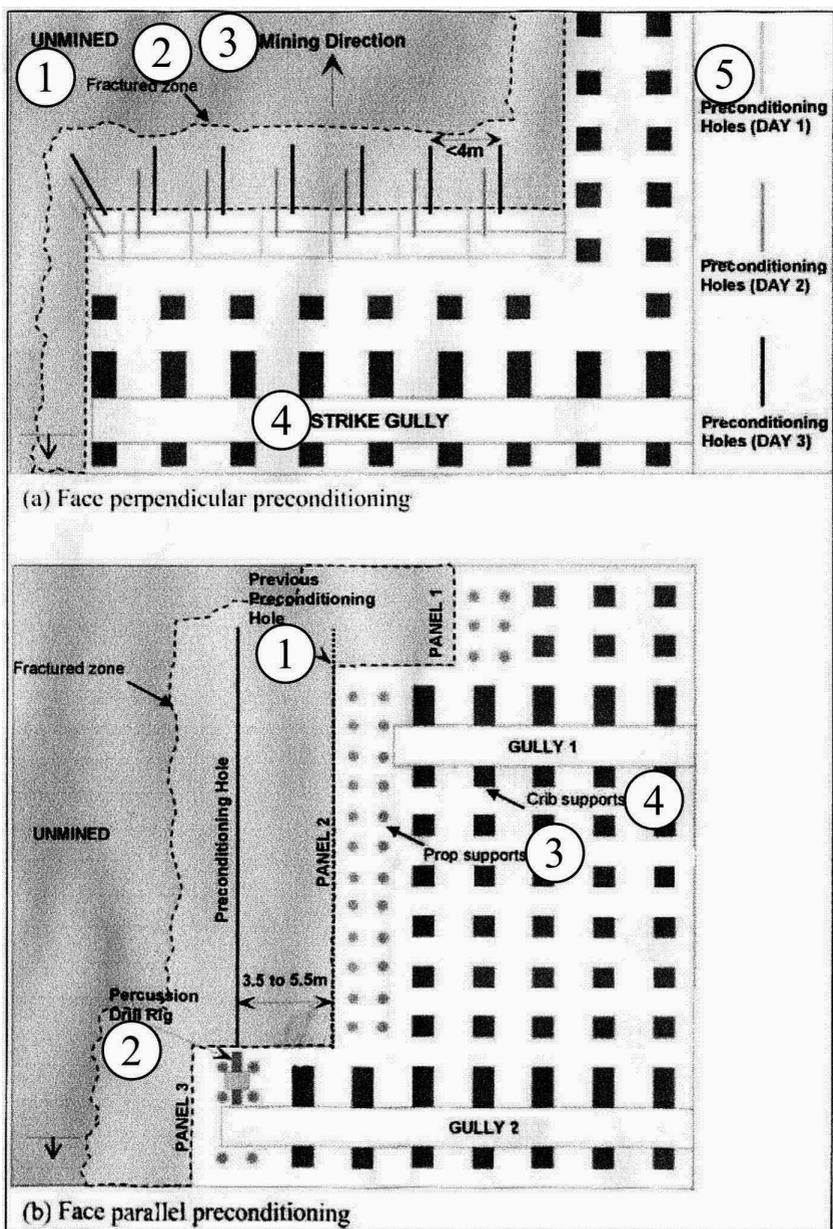


Рис. 3.46. Схемы бурения скважин перпендикулярных и параллельных забою в золотодобывающих шахтах Южной Африки

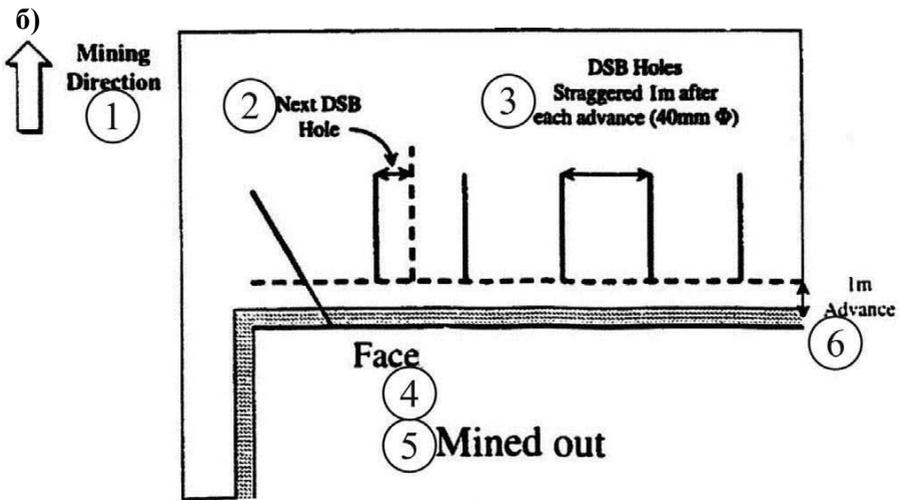


Рис. 3.47. Параметры бурения разгрузочных скважин параллельных и перпендикулярных забою на шахте Blyvooruitzicht (окончание)

а) скважины, параллельные забою.

1 – направление отработки; 2 – скважины, параллельные забою; 3 – уступ, в который производится бурение разгрузочных скважин; 4 – разрабатываемый уступ; 5 – перспективный уступ; 6 – участок скважины для размещения забойки; 7 – отработанная часть.

б) скважины, перпендикулярные забою.

1 – направление отработки; 2 – расстояние между разгрузочной и продуктивной скважинами; 3 – расстояние между разгрузочными скважинами 1 м предыдущего и последующего разгрузочного циклов; 4 – забой; 5 – отработанная часть; 6 – опережение 1 м.

Разгрузочное взрывание применялось также в нескольких шведских рудных шахтах. В шахте Nasliden разгрузка в уступах испытывалась из-за высоких горизонтальных напряжений, вызывающих интенсивное расслоение кровли. Идея разгрузки состояла в уменьшении жесткости части породных масс, близких к полости экскавации для того, чтобы перераспределить напряжения, отдалив их от забоя в сторону массива.

Оптимальное расположение разгрузочных скважин определялось цифровыми моделями с использованием метода конечных элементов. Модель показала, что если отношение прочности породы в щели, образовавшейся при взрывании скважин, к прочности породы в массиве находится в пределах 2,5-10%, горизонтальные напряжения в кровле уменьшаются на 37-60% (рис. 3.48).

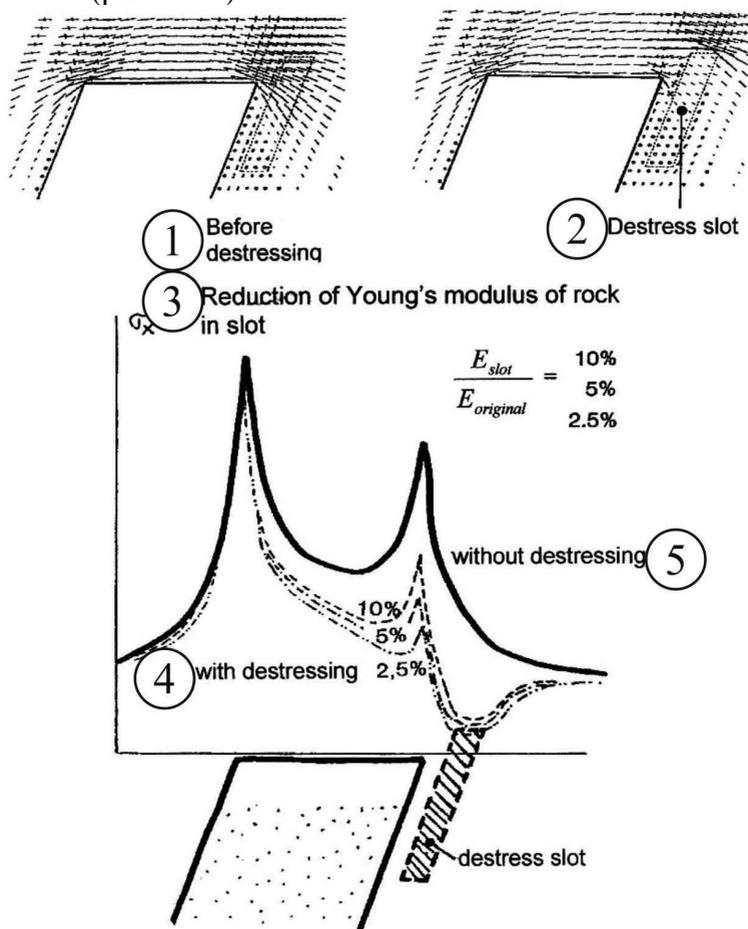


Рис. 3.48. Моделирование эффекта разгрузки кровли созданием разгрузочной щели в лежащем боку рудного тела

1 – перед разгрузкой; 2 – разгрузочная щель; 3 – уменьшение модуля Юнга породы в щели; 4 – с разгрузкой; 5 – без разгрузки.

Полевые испытания проводились в уступе 3. Щель была взорвана со стороны лежачего бока, однако эта попытка разгрузки не удалась, поскольку породы вокруг разгрузочных скважин не были достаточно разрушены. Причиной этого была низкая скорость детонации и расположение щели в податливом слое хлорита.

Выводы, сделанные из этих испытаний, были следующими:

- разгрузочное взрывание целесообразно, если высоконапряженные породы являются хрупкими, а применение болтов и набрызгбетона при креплении полостей недостаточно для обеспечения стабильности забоя;

- разгрузочная щель должна быть расположена достаточно далеко от кровли и почвы будущей экскавации, чтобы не повредить их;

- разгрузочные скважины должны быть расположены близко друг к другу так, чтобы сформировать щель из разрушенных пород.

После этих работ разгрузочное взрывание испытывалось в уступе 5 из-за высоких горизонтальных напряжений в нем, приводивших к внезапным выбросам и интенсивному расслоению пород кровли. Высокие напряжения в рудном теле вызывались его послойной выемкой. Для того, чтобы избежать повреждений кровли, разгрузочное взрывание проводилось во время отработки предпоследнего слоя. Разгрузочные скважины взрывались одновременно с продуктивными. В течение первых четырех циклов заметных эффектов не наблюдалось, но после четвертого цикла выбросы прекратились и расслоение кровли уменьшалось.

В шахте Laisvall короткозабойная система разработки характеризовалась высокими горизонтальными напряжениями, несмотря на относительно небольшую глубину около 220м. Плоское рудное тело обрабатывалось с помощью двух параллельных штреков – 1400 и 1500 (рис. 3.49). Штрек 1400 проводился первым, за ним в 15 м следовал штрек 1500.

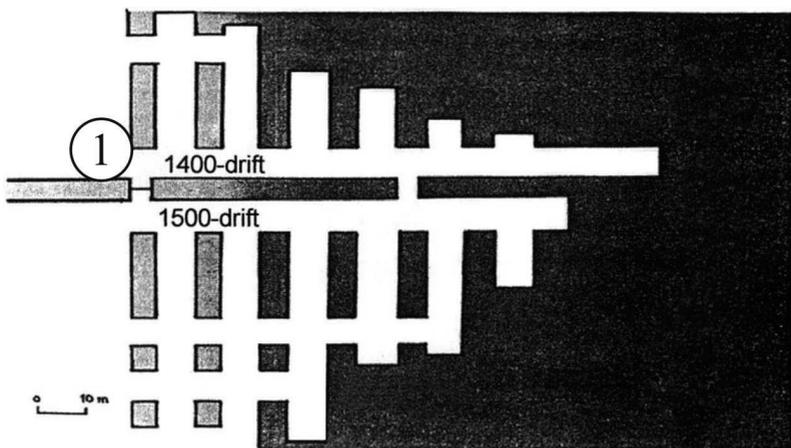


Рис.3.49. Клинообразная форма отработанной площади в шахте Laisvall
1 – штрек.

Добычные работы выполнялись перпендикулярно к этим штрекам, из-за чего фронт работ получил клинообразный вид. Расслоение пород кровли приобрело форму перевернутого кия (рис. 3.50), что происходило, главным образом, в ходе экскавации первого штрека. Глубина обрушений составляла 0,8-1,5 м. Таким образом, казалось, что второй штрек проводится в разгруженной зоне, однако, установка в нем крепежных болтов была недостаточной для прекращения расслоения и обеспечения безопасности. В связи с этим было решено применить разгрузочное взрывание из опережающего штрека, которое выполнялось параллельными скважинами одновременно с продуктивным (рис. 3.51).

Скважины заряжались 1 кг взрывчатого вещества на длине 0,6-0,7 м. Трециноватая зона, образовавшаяся после взрыва, составила 2-5 м в ширину и 1,5 м в высоту.

Обследование поведения пород в выработке после этих работ показало, что ее повреждения, вызванные высокими напряжениями массива, стали менее интенсивными в местах проведения разгрузочного взрывания. Иногда оно не выпол-

нялось, как намечалось ранее, и здесь повреждения увеличились, что показало эффективность предпринятых мер.

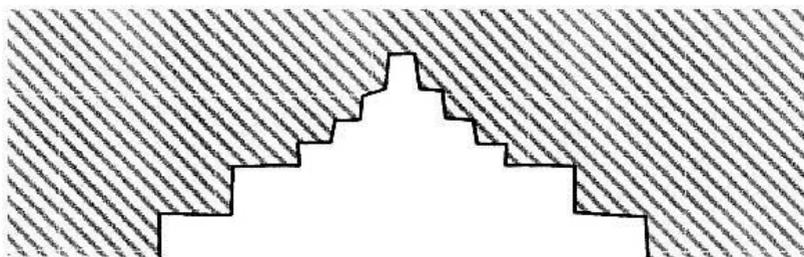


Рис. 3.50. Схема клинообразной формы отработанной площади

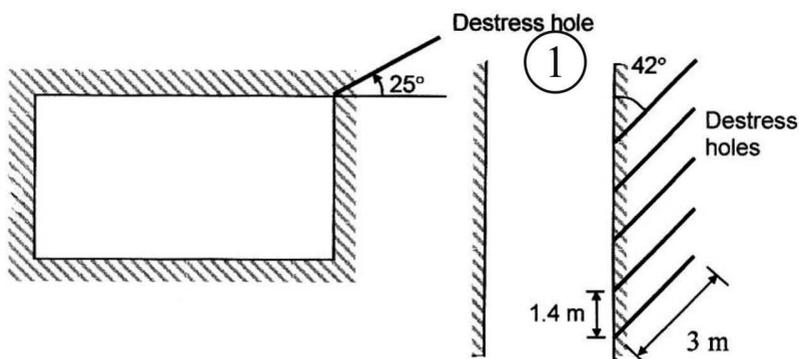


Рис. 3.51. План расположения разгрузочных скважин
1 – разгрузочные скважины.

В шахте MalMBERGET экскавация на главном горизонте 815 м замедлялась из-за тяжелых сейсмических проблем. В выработке сечением 60 м² сейсмичность привела к расслоению пород на высоту около 4 м выше ожидаемого уровня, формируя кровлю наклонной или куполообразной (рис. 3.52, 3.53). Для того, чтобы увеличить безопасность и скорость подвигания забоя, проводились испытания разгрузочного взрывания по схеме, показанной на рис. 3.54.

После нескольких циклов взрывания было решено бурить только три скважины, чтобы избежать избыточного по-

вреждения пород. Испытания проводились в обе стороны выработки с расстоянием между скважинами 1 м и весом заряда в каждой 1 кг.

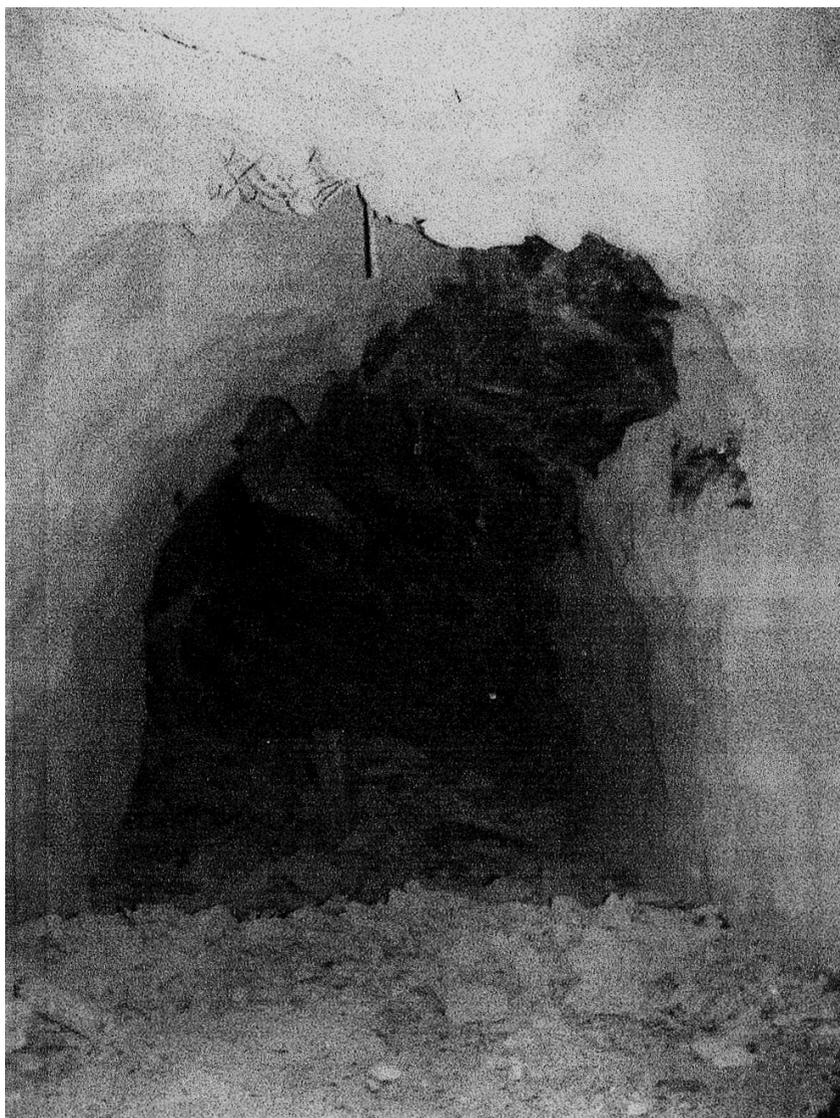


Рис. 3.52. Куполообразная форма полости, образовавшейся в туннеле после внезапного выброса пород

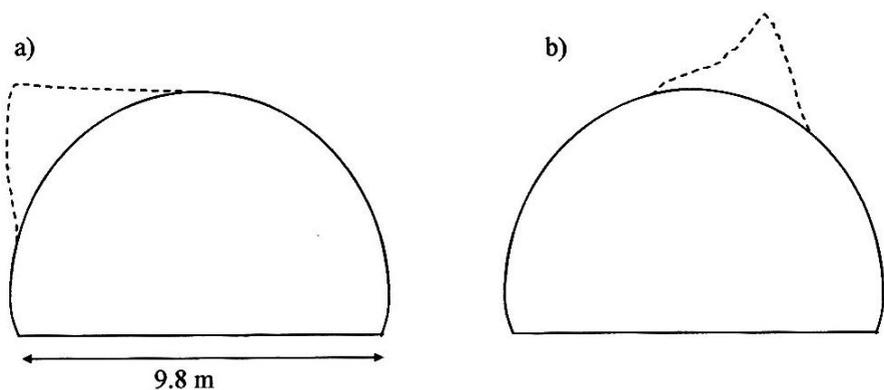


Рис. 3.53. Схемы образования полостей при внезапных выбросах в туннеле

а) наклонная кровля; б) куполообразная форма.

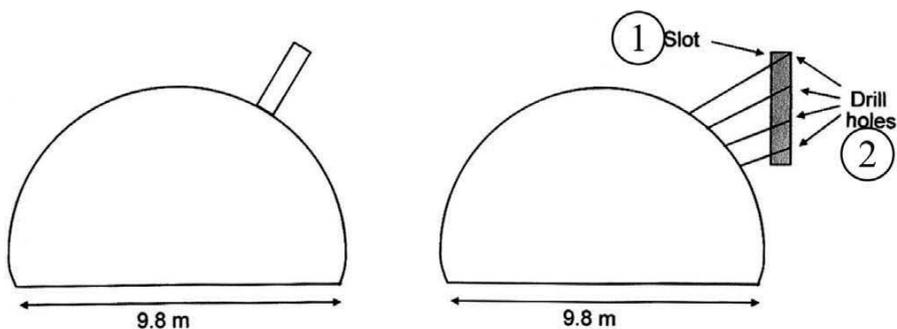


Рис. 3.54. Схема создания разгрузочной щели в кровле туннеля

а) принципиальное решение.

б) разгрузочные скважины.

1 – щель; 2 – бурение скважин.

Результаты испытаний показали существенное уменьшение сейсмичности и перебора пород в сечении выработки.

Примером применения разгрузочного взрывания в строящихся выработках служит шахта Creighton, Ontario, Канада (рис. 3.55, 3.56), где к отработке готовилось рудное сульфидное тело мощностью 122 м с простиранием 183 м, за-

легающее под углом 65° . Для его отработки применялись три способа:

- со стороны висячего блока массива – субвертикальными в плоскости залежи взрывными скважинами;
- в центре мощности рудного тела – горизонтальными скважинами с восходящим порядком отработки и закладкой выработанного пространства;
- со стороны лежачего бока массива – горизонтальными скважинами с нисходящим порядком отработки и закладкой выработанного пространства.

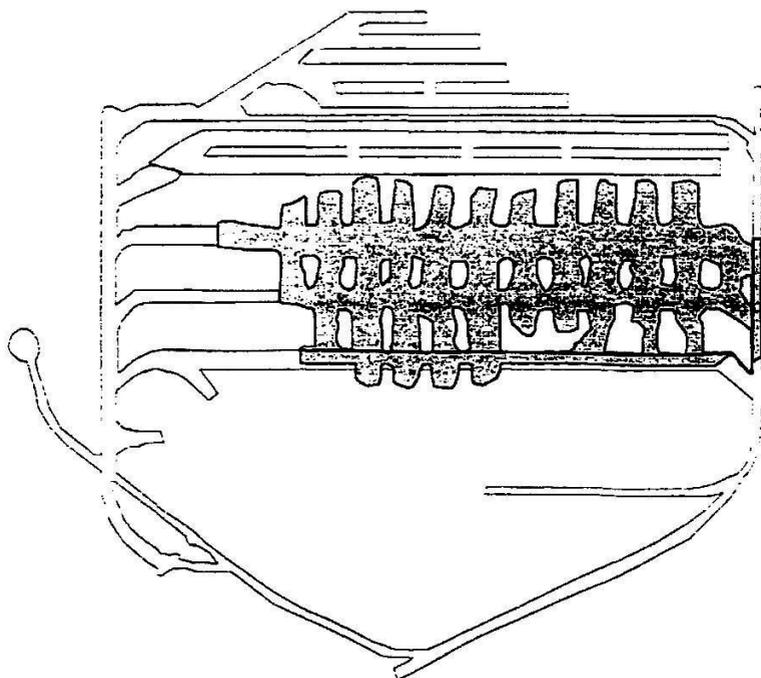


Рис. 3.55. Разгруженные взрыванием штреки шахты Creighton

Основные горизонты шахты – 2073 м, 2134 м и 2195 м подготавливались спаренными штреками с размерами сечения 3,4 x 3,7 м, разделенными целиком шириной 3 м. На гор. 2195 м высота штреков была увеличена до 4,6 м. Напряжения массива

составляли 100 МПа в направлении восток-запад, 79МПа – в направлении север-юг и вертикальные – 62 МПа. Прочность пород лежачего бока месторождения варьировалась от 17 до 250 МПа, висячего бока – составляла примерно 160 МПа. Для крепления штреков применялись анкерные болты длиной 1,8м диаметром 15мм с металлической сеткой 10x10см. Скважины для разгрузочного взрывания длиной 3м имели диаметр 43 мм и 54 мм. Участок скважины занятый взрывчатым веществом, был равен 0,9 и 1,5м.

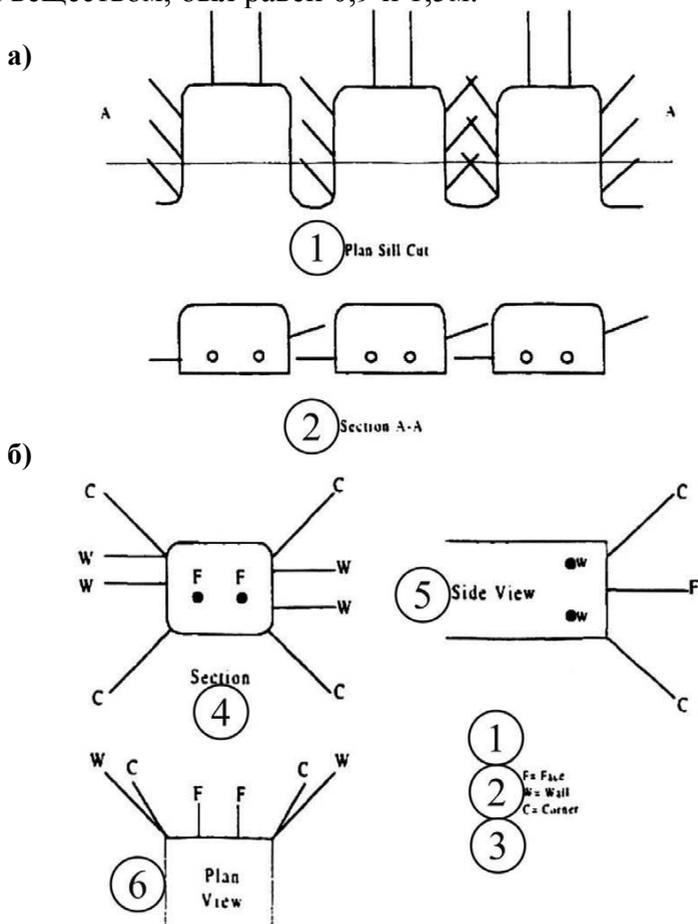


Рис. 3.56. Применение разгрузочного взрывания в строящихся выработках шахты Creighton

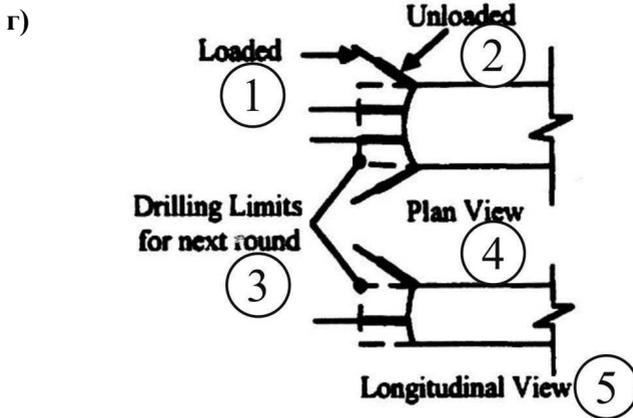
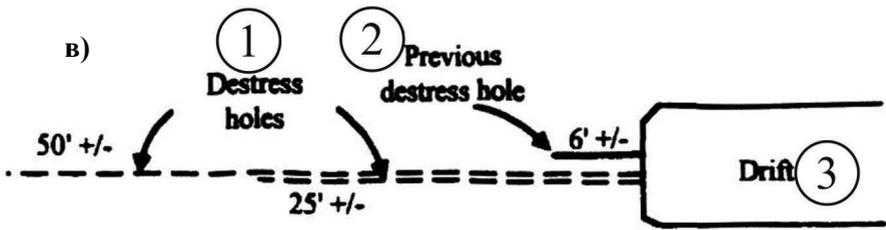


Рис. 3.56. Применение разгрузочного взрывания в строящихся выработках шахты Creighton (окончание)

а) расположение разгрузочных скважин на гор. 2073 м.

1 – план; 2 – сечение.

б) расстояние скважин в штреке гор. 2195 м.

1 – F-скважины в забое; 2 – W-скважины в стенах; 3 – С-скважины в углах; 4 – сечение; 5 – вид сбоку; 6 – план.

в) вариант бурения разгрузочных скважин в штреке.

1 – разгрузочные скважины; 2 – ранее пробуренная разгрузочная скважина; 3 – штрек.

г) вариант разгрузочного взрывания в штреке шахты Creighton.

1 – загружаемые взрывчатый веществом; 2 – незагружаемые взрывчатый веществом; 3 – границы бурения для следующего цикла; 4 – план; 5 – продольный разрез.

На гор. 2073 м вначале бурились только две скважины одинаковой длины 3 м по углам штрека, расходящиеся под углом 30° . Результаты такого взрывания были неудовлетворительными и оно возобновилось с добавлением двух скважин в центре забоя, перпендикулярных ему, длиной по 6 м с размещением взрывчатки на длине 1,5 м. После этого были получены удовлетворительные результаты, однако, малые выбросы продолжались. Это потребовало бурения горизонтальных скважин длиной 3 м в целик между штреками под углом 45° к их направлению с размещением взрывчатки на длине 0,9 м. Была также усилена крепь штреков установкой болтов Split Set длиной 1,7 м и жестких стержней длиной 1,8 м, затампонированных полимером. Такое решение, в конце концов, дало хорошие результаты, поскольку внезапные выбросы происходили только во время разгрузочного взрывания.

Подобные процедуры выполнялись также на гор. 2134 м. Кроме того, цикл добычных работ здесь заканчивался в конце недели для того, чтобы за выходные дни провести цикл разгрузочных работ. Во время отработки этого горизонта из одиннадцати выбросов только один произошел в рабочее время.

На гор. 2195 м выполнялись такие же операции с доведением числа разгрузочных скважин на цикл до 10. Дополнительными болтами усиливалась крепь штреков. Во время разгрузочного взрывания число внезапных выбросов составляло 85% от их общего числа на горизонте, что соответственно снизило опасность во время добычных работ.

На шахте Strathcona, Falconbridge, Канада внезапные выбросы происходили в целиках, оставленных у вскрывающих квершлагов и в выработанном пространстве. Трещины, вызванные напряжениями, наблюдались в кровле и стенах глубиной до 1,2 м. В районах квершлагов, где цифровое моделирование показало критический уровень напряжений, устанавливались дополнительные болты длиной 2,4 м и проволоочная

сетка (пункты А, В, D рис. 3.57). Длина разгрузочных скважин составляла 5,5 м.

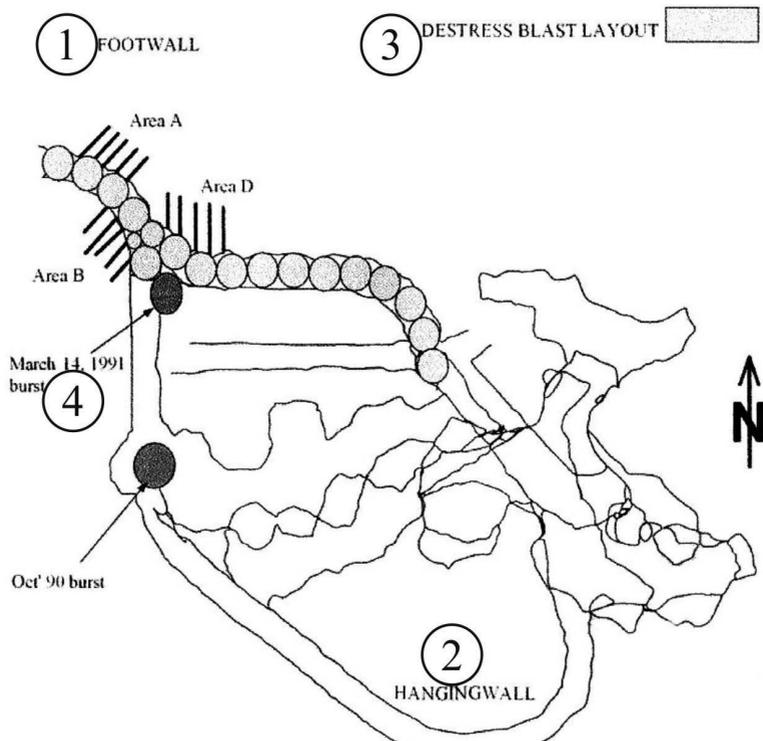


Рис. 3.57. Разгрузочное взрывание в квершлагах шахты Strathcona

1 – лежащий бок; 2 – висячий бок; 3 – места разгрузочного взрывания; 4 – места и даты выбросов.

Породы представляли собой полевошпатный гнейс хорошего качества с пределом прочности 300 МПа. Природные системы трещин простирались на длину от 3 до 10 м. Породные блоки имели шероховатую поверхность сочленений, заполненных хлористым тальком. Рудное тело представляло собой сульфат никеля с прочностью на сжатие 110 МПа и углом падения до 30-40°. Напряжения, в том числе, вызванные горными работами, превышали 110 МПа.

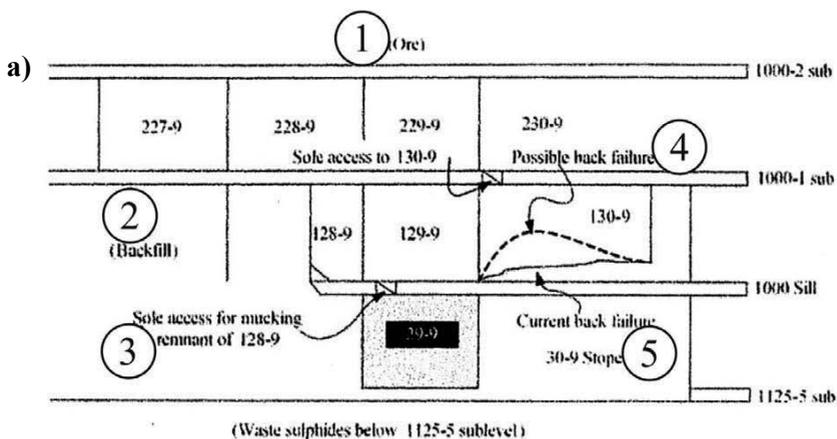
Месторождение разрабатывалось на двух основных транспортных горизонтах 3700 и 3900 (3700 фут = 1130 м, 3900 фут = 1200 м) тремя субгоризонтами над первым и семью – над вторым основными горизонтами. Каждый из субгоризонтов обслуживался штреками с размерами 4,6 x 4,6 м, из которых проводилось разгрузочное взрывание.

Разгрузочные скважины (в количестве 66) длиной 5,5 м, диаметром 63 мм располагались с интервалом 2,1 м и заряжались взрывчатым веществом с удельным расходом от 0,11 до 0,16 кг/м³. Разгрузочное взрывание вызвало перемещение поверхности пород на глубину до 0,5 м по линии скважин и в точках установки крепежных болтов. В некоторых местах формировались кратеры глубиной до 0,3 м.

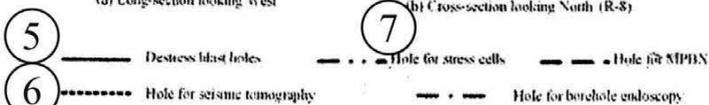
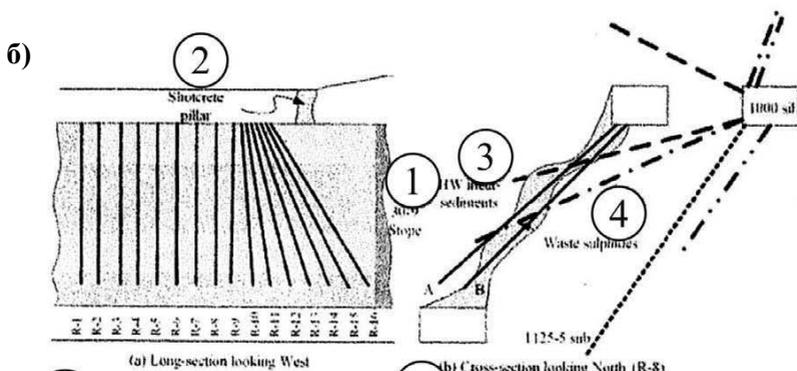
Разгрузочное взрывание не всегда приносит ожидаемые результаты. Так, на шахте Campbell Red Lake, Ontario, Канада оно только расширило существующие трещины на коротком расстоянии 1,4 м от скважин диаметром 45 мм. На шахте Sigma, Quebec, Канада разгрузочное взрывание увеличило прочность массива вместо того, чтобы ослабить его.

На шахте Brunswick, Ontario, Канада добычные работы встретили высокие напряжения пород, хотя экскавация велась на горизонте 1000 (1000 фут. = 300 м). На рис. 3.58 а показан уступ 29-9 с размерами 45 x 30 x 5 м, состоящий из крепкой и жесткой руды сульфида цинка с низким содержанием металла. Целью разгрузочных работ было создание защиты от выбросов в двух других параллельных жилах, содержащих богатую руду. Прочность породного массива на сжатие составляла 200 МПа. Разгрузочные скважины диаметром 165 мм со средней длиной 20 м располагались по решетке 2,4 x 2,4 м (рис. 3.58 б). Расход взрывчатых веществ составил примерно 2,5 кг/м³.

Результаты разгрузки показали, что штрек, с которого бурились скважины, был завален отбитой породой, выброшенной после разгрузочного взрывания, а в обработанном уступе разгрузка не вызвала трещинообразования.



a) Longitudinal section showing pillar 29-9



b) Destress blasting pattern and instrumentation of the 29-9 pillar

Рис. 3.58. Разгрузка целиков на шахте Brunswick

a) продольный разрез по целику 29-9.

1 – руда; 2 – закладка; 3 – доступ для погрузки отбитой руды уступа 128-9; 4 – возможное обрушение пород в штреке; 5 – фактическое обрушение пород.

б) разгрузочное взрывание в целике 29-9.

1 – уступ 30-9; 2 – перемычка из набрызгбетона; 3 – осадочные породы; 4 – вскрышные породы (сульфиды); 5 – скважины разгрузочного взрывания; 6 – скважины для сейсмической томографии; 7 – скважины различного назначения.

Описанные случаи показывают, что дизайн разгрузочного взрывания должен быть тщательно продуман с учетом исторических данных и конкретных условий. Это особенно важно в связи с переходом подземных работ на все более глубокие горизонты и усложнением сейсмической обстановки.

Необходимость вскрытия и подготовки таких горизонтов требует большого внимания, в частности, к выработкам туннельного типа с точки зрения снижения риска внезапных выбросов пород. На рис. 3.59 показана типичная схема расположения разгрузочных скважин в туннелях рудных шахт Канады. Здесь две скважины F (face – забой), которые бурятся в забое, имеют длину по 7,3 м, четыре скважины W (wall – стена), которые бурятся в стены выработки, имеют длину по 3,6м, четыре скважины C (corner – угол), которые бурятся в углах сечения, имеют длину по 3,6 м.

Обобщая опыт разгрузочного взрывания на разных шахтах мира, можно сделать следующие практические выводы:

- целью разгрузочного взрывания служит перемещение концентрации напряжений и связанной с ней сейсмической активности глубже в породный массив с обычных 3м до 5м от действующего забоя. Поэтому разгрузочное взрывание должно быть частью регулярного производственного цикла, систематически отодвигая от забоя сейсмоопасную зону;

- разгрузочное взрывание должно расширять уже существующую систему трещиноватости скорее, чем создавать и распространять новую;

- разгрузочные скважины должны быть равноудалены от висячего и лежачего боков массива, вмещающего рудное тело, чтобы предотвратить их повреждения, вызванные взрывом;

- глубина скважин (до 9-10 м) является функцией размера разгруженной зоны, магнитуды индуцированных напряжений, системы разработки и механизации, применяемой в шахте;

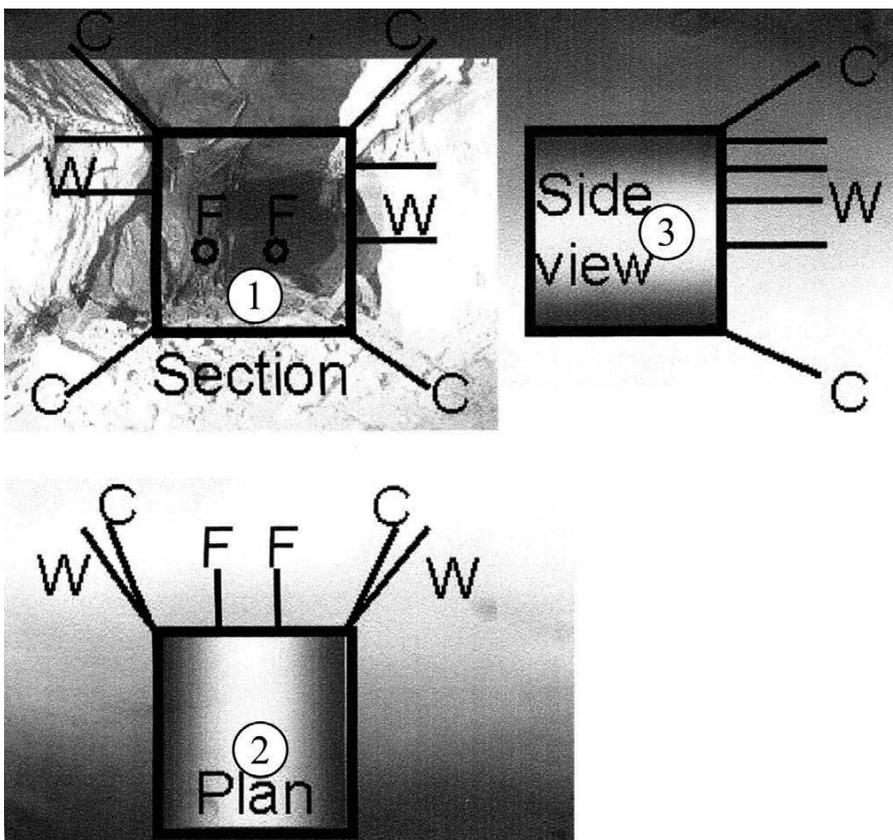


Рис. 3.59. Типичное расположение разгрузочных скважин в туннелях

1 – сечение; 2 – план; 3 – разрез.

- размер трещиноватой зоны вокруг разгрузочных скважин зависит от ориентации главных напряжений;
- критической является своевременность работ. Разгрузочное взрывание, выполняемое слишком рано, может позволить напряжениям восстановиться до значений, порождающих выброс в рабочую смену, выполняемое слишком поздно, приводит к увеличению времени возможного воздействия выброса;

- операции разгрузочного взрывания задерживают продуктивный процесс и поэтому требуют сравнения расходов на их выполнение (с учетом ущерба от потери добычи) с затратами, связанными с ликвидацией последствий выброса в случае отказа от разгрузочных работ;

- любые отказы заряда, возникающие в ходе разгрузочного взрывания, могут представлять опасность во время последующих работ. Необходимы время и затраты труда, чтобы убедиться в возможности дальнейших производственных операций.

3.4 Комплекс противовыбросных мер на шахте Big Bell

Шахта Big Bell расположена в провинции Murchison Западной Австралии. Месторождение золота разрабатывается с добычей 4,76 т/год, имеет среднюю мощность 5-8 м, достигая в центральной части 50 м (рис. 3.60), Расположено в нефритах и осадочных породах, простираясь под углом 30^0 к северу на расстояние 1000 м и падая – на восток под средним углом 72^0 , до глубины 1430 м. В составе структур, формирующих залежь, имеется срезанная плоскость графита.

Погоризонтная отработка залежи производится субгоризонтным обрушением в нисходящем порядке. Расстояние по глубине между субгоризонтами равно 25 м. В настоящее время шахта работает на горизонтах 485 м, 510 м и 535 м. На рис. 3.61 показаны типичные схемы вскрытия и подготовки рудной залежи, аналогичные принятым на шахте Big Bell. В реальных условиях шахты эти схемы дополнены погоризонтными полевыми штреками (туннельного типа), которые располагаются в лежащем боку массива, тогда как спаренные субгоризонтные штреки проводятся по рудному телу.

Характеристика породных масс приведена в табл. 3.4 – 3.6. Недавняя сейсмическая история шахты сведена в табл. 3.7. Выбросы пород обычно происходили:

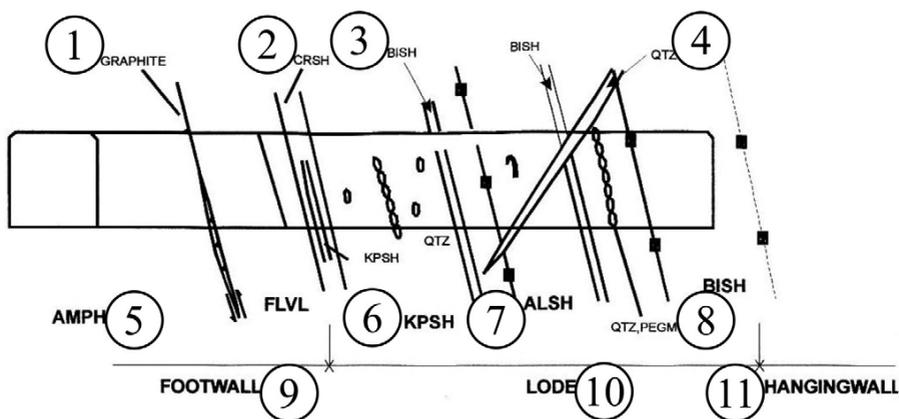


Рис. 3.60. Схематическое сечение по рудному телу шахты Big Bell

1 – графит; 2 – кордиеритовый сланец; 3 – биотитовый сланец;
 4 – кварцит; 5 – амфиболитовый сланец; 6 – калийно-
 полевошпатный сланец; 7 – видоизмененный сланец; 8 – кварцит,
 пегматит; 9 – лежачий бок; 10 – золотоносная залежь; 11 – висячий
 бок.

- в висячей стене сечения полевых штреков, расположенных в лежачем боку залежи;
- в обеих стенах сечения участковых квершлагов (cross-cuts);
- на подготовительном горизонте ниже работающих горизонтов, у которых пролет выработанного пространства по простиранию превышал 100 м;
- в пределах 25 м на север или юг (по простиранию) от продуктивных взрывов вышележащего (работающего) горизонта;
- в пределах 24 часов после продуктивного взрыва на вышележащем горизонте.

Типичное распределение сейсмических событий, следующих за продуктивными взрывами на гор. 510 м, показано «пузырьковой» диаграммой (buble plot) на рис. 3.62, где размеры кружочков сравнительно соответствуют магнитуде события.

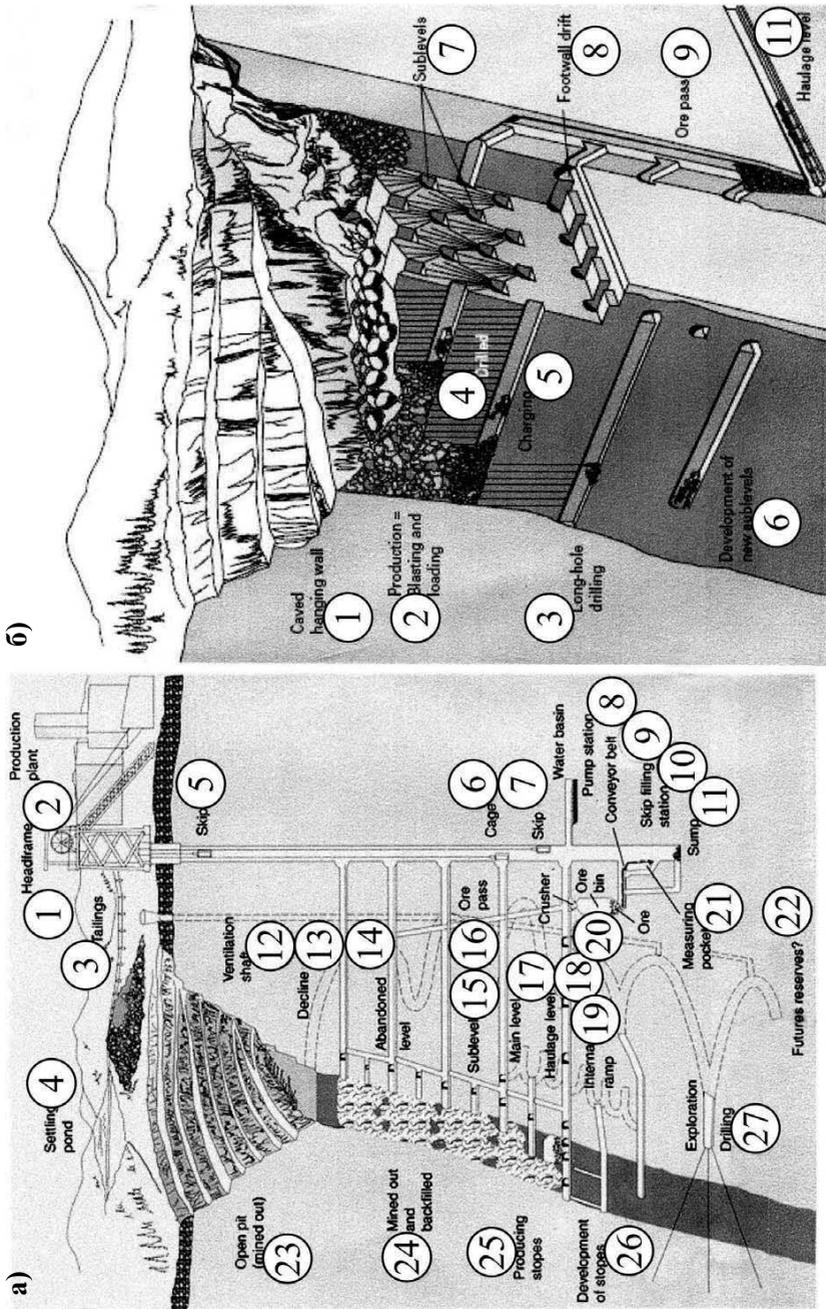


Рис. 3.61. Схемы вскрытия и отработки рудного тела субгоризонтами

Объяснения к рис. 3.61:

а) схема вскрытия.

1 – копер; 2 – обогатительная фабрика; 3 – хвосты обогащения; 4 – пруд-отстойник; 5 – скип; 6 – клеть; 7 – водосборник; 8 – насосная станция; 9 – ленточный конвейер; 10 – скиповое загрузочное устройство; 11 – зумпф; 12 – вентиляционный ствол; 13 – главная рампа; 14 – заброшенный горизонт; 15 – субгоризонт; 16 – рудоспуск; 17 – главный горизонт; 18 – транспортный горизонт; 19 – внутренняя (участковая) рампа; 20 – дробилка и бункер; 21 – измерительный карман; 22 – вскрытие резервов; 23 – открытые горные работы (отработано); 24 – отработано и заполнено закладкой; 25 – продуктивные уступы; 26 – подготовка уступов; 27 – разведочное бурение.

б) схема отработки.

1 – полость в висячем боку; 2 – добыча-взрывание и погрузка; 3 – бурение длинных скважин; 4 – уступ, подготовленный к взрыванию; 5 – зарядание; 6 – подготовка новых уступов; 7 – субгоризонт; 8 – штрек в лежащем боку; 9 – рудоспуск; 10 – транспортный горизонт.

Таблица 3.4 – Характеристика пород рудного тела шахты Big Bell

Вид пород (согласно рис.3.60)	Прочность на сжатие, МПа	Модуль Юнга, GPa	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м ³
AMPH	123,11	67,12	0,28	2570
LLSH	121,13	44,51	0,21	2800
BISH	103,42	51,42	0,23	2900
CRSH	136,5	51,7	0,18	2820
KPSH	141,2	43,4	0,27	2738

Большинство внезапных выбросов происходило в полевых штреках, расположенных в лежащем боку массива и включало срез незатронутых проходкой пород, примыкающих к расслоенному напластованию с западной стороны сечения (рис. 3.63). Обычно срез замечался в своде полости выброса и располагался в кровле штрека вдоль расслоенных пород по простиранию залежи на север и юг. Наблюдателями

отмечалось, что, несмотря на наличие в толще залежи срезанной плоскости графита, сдвигения пород вдоль нее не происходили.

Таблица 3.5 – Измеренные главные напряжения

Горизонт	Главные напряжения	Магнитуа, M_L	Падение, ($^{\circ}$)	Азимут, ($^{\circ}$)
350	максимальное	74,3	06	215
	промежуточное	38,1	07	306
	минимальное	19,3	81	086
380	максимальное	52,5	16	242
	промежуточное	29,6	19	338
	минимальное	22,8	65	114
485	максимальное	69,1	27	274
	промежуточное	34,3	06	007
	минимальное	29,9	63	109

Таблица 3.6 – Компоненты напряжений

Горизонт	Компоненты напряжений	Нормальные, МПа			Среза, МПа		
		N-S	E-W	верт.	NS-EW	EW-верт.	верт.-NS
350	Магнитуа	61,92	49,43	20,15	16,82	-5,06	-3,20
	Стандартная ошибка	(1,65)	(0,92)	(0,72)	(0,77)	(0,42)	(0,76)
380	Магнитуа	33,92	45,13	25,87	9,12	-7,91	-1,81
	Стандартная ошибка	(7,58)	(4,49)	(3,44)	(4,40)	(2,31)	(3,72)
485	Магнитуа	34,36	61,16	37,78	-1,70	-15,58	-1,58
	Стандартная ошибка	(3,29)	(4,49)	(2,35)	(2,85)	(2,16)	(1,95)

Эти наблюдения, а также данные шахтной сейсмической системы показали, что главным источником выбросов служила расслоенная поверхность пород лежачего бока массива. Магнитуа выбросов определялась сочетанием очень высоких

вертикальных и горизонтальных напряжений, способностью крепких пород хранить значительное количество энергии, ориентацией штреков, параллельных плоскостям напластования и максимальными напряжениями среза. Под добычным уступом вышележащего горизонта большие природные напряжения и расширение выработанного пространства были причинами соответствующего состояния в опорах уступов.

Таблица 3.7 – История недавних выбросов пород

Дата выброса	Магнитуда, M_L	Объем выброса, m^3	Горизонт	Расположение (по широте)
12 февраля 1999	нет данных	4	460	Рудоспуск (3655N)
16 июня 1999	нет данных	5	435	Штрек лежащего бока (3475N)
7 июля 1999	нет данных	2	485	то же (3775N)
9 августа 1999	1,9	12	485	то же (3790N)
22 августа 1999	2,2	20	460	то же (3805N)
25 ноября 1999	1,7	8	460	то же (3820N)
25 ноября 1999	2,4	40	485	то же (3845N)
6 апреля 2000	нет данных	3	510	Штрек лежащего бока (3775N)
11 апреля 2000	нет данных	1	485	то же (3840N)
8 мая 2000	нет данных	15	535	то же (3665N)
23 мая 2000	нет данных	0,2	535	то же (3775N)
17 июня 2000	2,2	60	535	то же (3765N)

Изменения уровня напряжений, вызванные горными работами, моделировались с использованием программы

МАРЗD. Примером ее анализа служит один из выбросов, приведенный в табл. 3.7 (22 августа 1999г.). Рассматривались два компонента:

- зоны максимальных главных напряжений (рис. 3.64) в штреке под забоем уступа и в соединениях штрека с участковыми квершлагами;
- плоскость напряжений среза вдоль расслоения пород в полевом штреке (рис. 3.65).

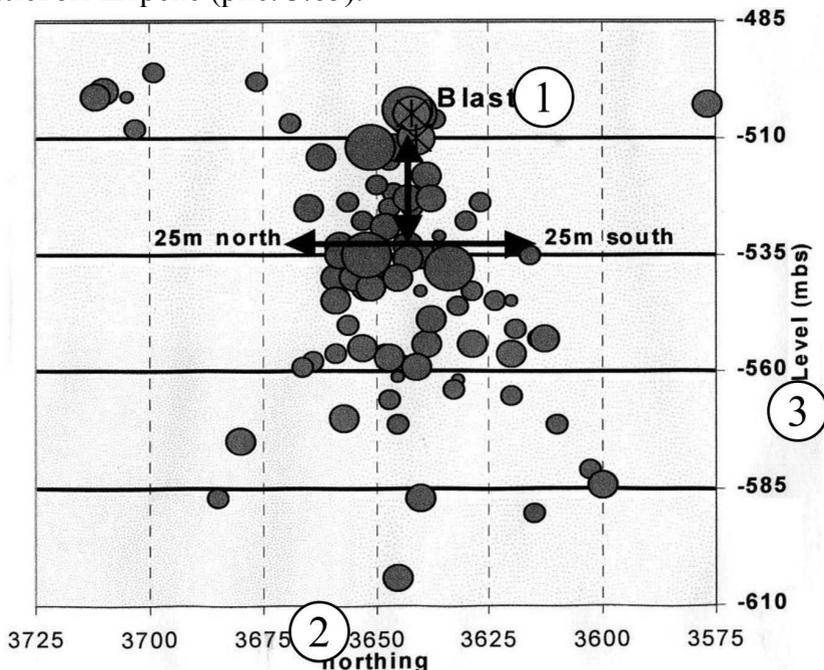


Рис. 3.62. Распределение сейсмических событий, следующих за продуктивным взрывом

1 – взрыв; 2 – простирание; 3 – горизонты.

Полученные результаты исследований позволили разработать стратегические и тактические меры по снижению опасности внезапных выбросов на шахте Big Bell.

К стратегическим мерам можно отнести изменение расположения полевых штреков по отношению к рудному телу. Для уменьшения концентрации напряжений штреки удаля-

лись от рудного тела на расстояние 40 м вместо принятых ранее 20 м. Штреки были развернуты на угол 10^0 к плоскости расслоения, что уменьшило их уязвимость к выбросам. С той же целью пункт загрузки вагонеток был вынесен с полевого штрека и доступ к нему осуществлялся через короткую рампу длиной 20 м (рис. 3.66). Кроме удаления от выбросоопасной зоны пункта загрузки, имеющего большой пролет кровли, такое решение позволило также уменьшить сечение полевого штрека, необходимое для выполнения перегрузочных операций.

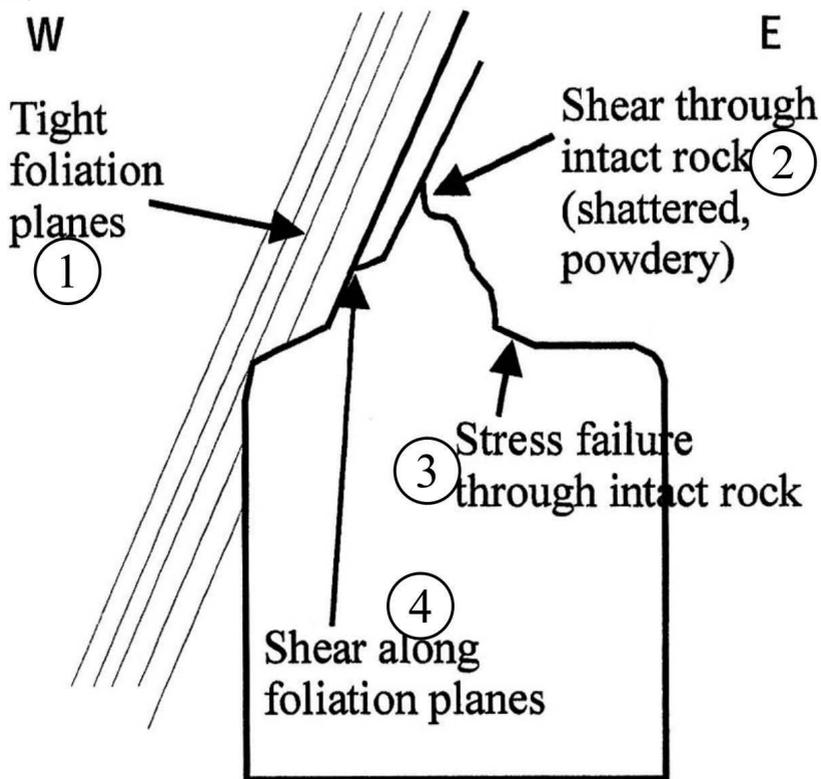


Рис. 3.63 Сечение полевого штрека в месте внезапного выброса пород

1 – плоскости расслоения; 2 – срез нетронутых пород (раздробленных, порошкообразных); 3 – напряженное обрушение нетронутых пород; 4 – срез вдоль плоскостей расслоения.

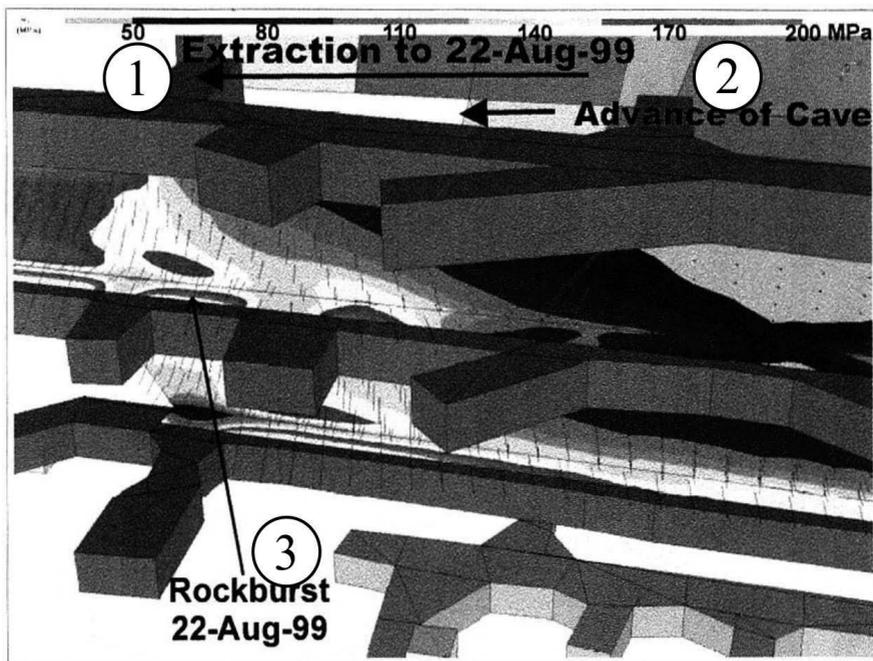


Рис. 3.64. Моделирование зоны максимальных главных напряжений в штреке перед забоем уступа
1 – подвигание полости; 2 – извлечение руды к 22 августа 1999 г.;
3 – внезапный выброс 22 августа 1999 г.

Уменьшение воздействия напряжений добычных работ одного горизонта на другой достигалось расположением забоев работающих уступов в шахматном порядке с разнесением одновременно действующих забоев, по крайней мере, на 25м. С целью исключения проведения полевого штрека в опорных выбросоопасных зонах уступов двух вышележащих разрабатываемых горизонтов, принято решение о вводе в действие этих уступов после завершения проходческих работ в полевом штреке следующего (подготавливающего) горизонта.

В качестве тактических мер по снижению выбросоопасности предусматривалось усовершенствование системы крепи полевых штреков с применением податливых болтов и прове-

дение разгрузочного взрывания. Имеющаяся система крепи штреков включала болты Split Set, механические анкера, сетку и канатные анкера в пересечениях выработок. Во время выбросов болты Split Set вытягивались из скважин, механические анкера разрушались, сетка отделялась от висячей стороны штрека.

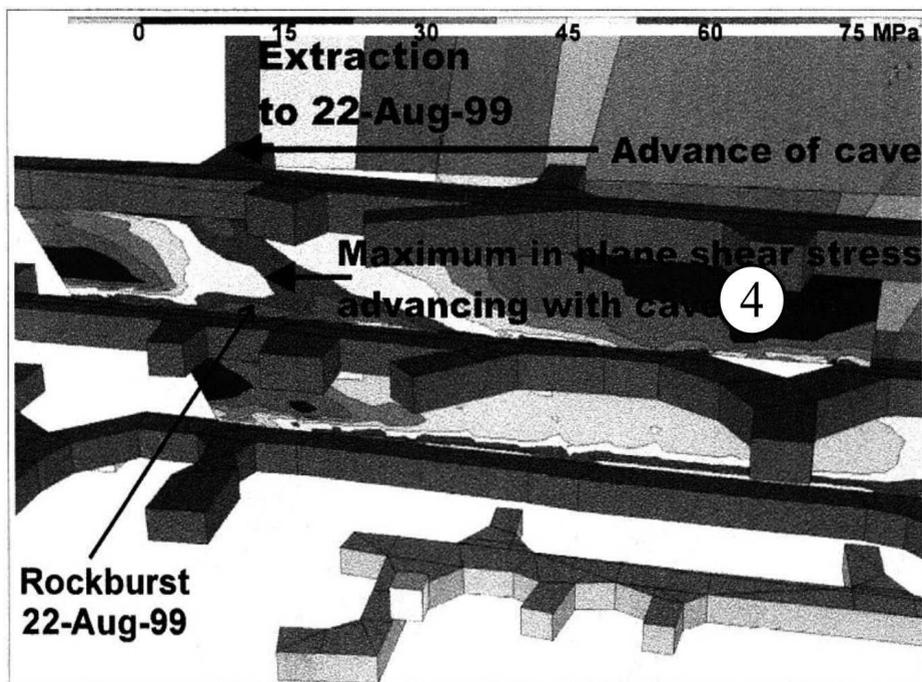


Рис. 3.65. Моделирование плоскости напряжений среза вдоль расслоения пород

Обозначения аналогичны рис. 3.64; 4 – максимальное напряжение среза, подвигающееся с полостью.

В связи с этими повреждениями была сделана попытка усилить крепь: канатные анкера тампонировались, под них устанавливались опорные плиты. Однако разрушение болтов Split Set и сетки продолжалось. Эти усиленные, но относи-

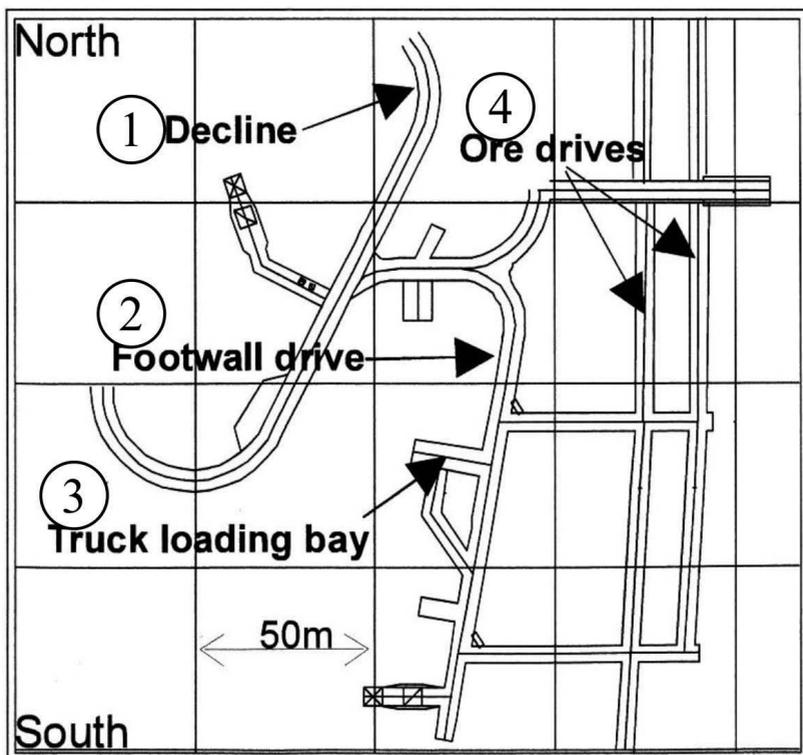


Рис. 3.66. Изменение планировочных решений на гор. 560 м
 1 – главная рампа; 2 – полевой штрек в лежачем боку массива;
 3 – погрузочный пункт; 4 – штреки, пройденные по рудному телу.

тельно жесткие элементы крепи оказались неэффективными в выбросоопасных условиях. В частности, главный выброс 25 ноября 1999 г. на гор. 485 м разрушил всю крепь в зоне воздействия, имевшую расчетное статическое сопротивление, превышающее 230 кН/м^2 (рис. 3.67). Поврежденный участок включал болты Split Set с сопротивлением 50 кН/м^2 и канатные анкера с сопротивлением 125 кН/м^2 , механические анкера с сопротивлением 25 кН/м^2 и сетку 30 кН/м^2 .

За месяц до этого события в некоторых весьма напряженных участках ранее пройденного полевого штрека гор. 460 м были дополнительно установлены конусные болты и

болты Gewi (рис. 3.68). Поэтому в этом штреке последствия выброса 25 ноября оказались не такими значительными, а результаты их анализа привели к выводу, что деформации пород при сейсмических событиях могут сдерживаться конусными болтами. Выбросы 6 апреля 2000 г. в штреке гор. 510м и 23 мая 2000 г. в штреке гор. 535 м также успешно контролировались такими болтами (рис. 3.69).

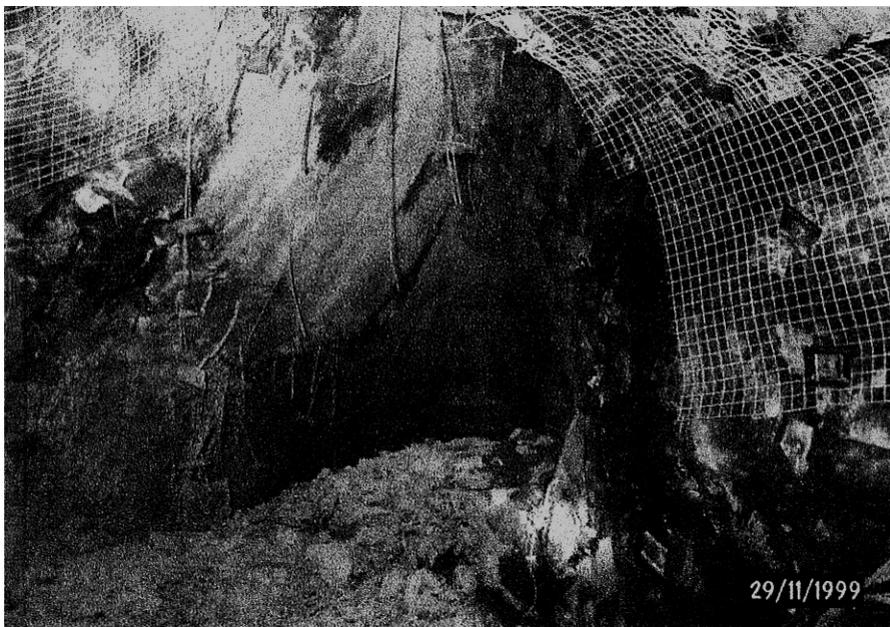


Рис. 3.67. Последствия внезапного выброса пород 25 ноября 1999г. в полевом штреке

Конусные болты размещались на расстоянии двух циклов подвигания от забоя. Болты Split Set длиной 1,8 м устанавливались рядами с интервалами 1,1 м и расстоянием между болтами 1,2 м. Металлическая сетка толщиной 6 мм и ячейками 100x100 мм дополнительно усиливалась сваркой специального горного применения. В ряду крепи устанавливались 6 конусных болтов. Два внешних болта имели длину

2,4 м, четыре центральных – 3 м. В пересечениях выработок устанавливались болты длиной 4 м.

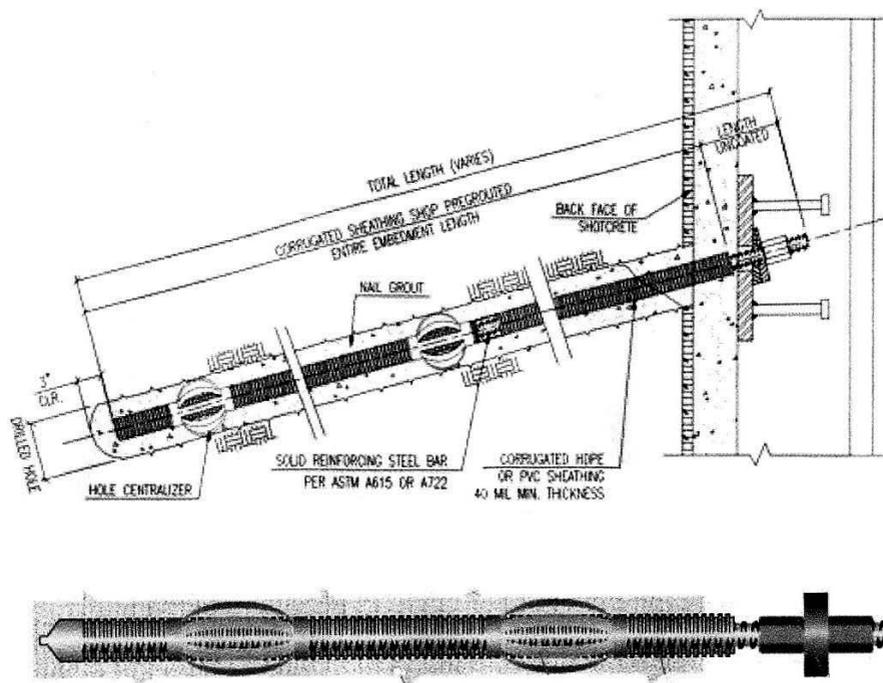


Рис. 3.68. Общий вид и схема установки болтов Gewi

В штреке производилось также опережающее разгрузочное взрывание. Две скважины длиной 4,2 м бурились под наружным углом 45° в верхних углах штреков. Каждая из скважин заряжалась взрывчатой эмульсией.

Возникновение внезапных выбросов пород на шахте Big Bell обычно во времени и пространстве зависело от продуктивных взрывов вышележащего горизонта. Поэтому для минимизации риска персонала после выбросов 1999 г. был увеличен до 24 часов интервал между этими взрывами и доступом рабочих в забой штрека. Однако, в результате стратегических мер по рассредоточению разработки уступов и накоп-

ления данных о распределении во времени суток сейсмических событий и внезапных выбросов пород, происходящих после взрывных работ (рис. 3.70, 3.71), этот интервал доступа в забой был уменьшен до 12 часов, что позволило сократить потери рабочего времени.

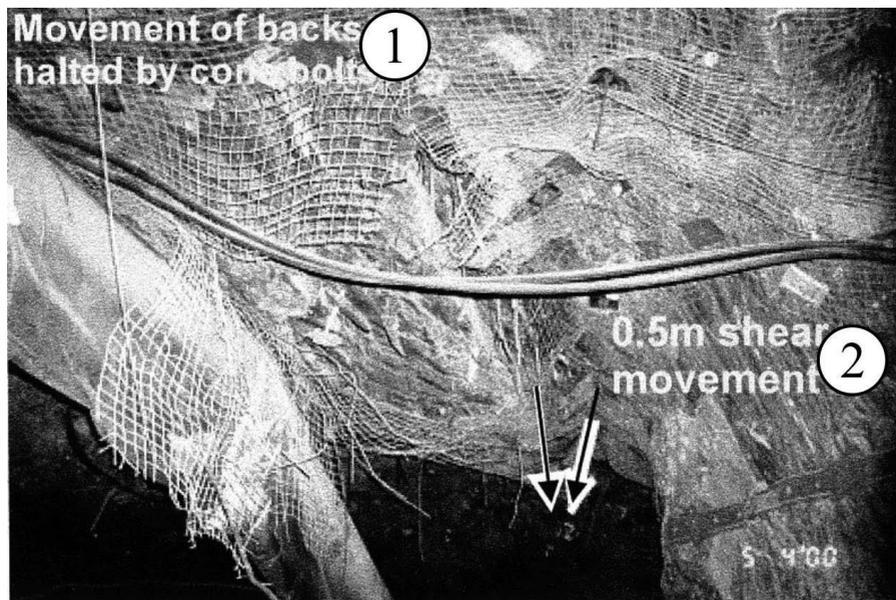


Рис. 3.69. Последствия внезапного выброса пород 6 апреля 2000г. в полевом штреке гор. 510 м

1 – движение кровли, остановленное конусным болтом; 2 – движение среза на 0,5 м.

В настоящее время результаты принятых на шахте противовыбросных мер признаны успешными. Продолжающийся сейсмический мониторинг позволяет совершенствовать геометрию горных работ и системы крепи, а, следовательно, уменьшать воздействие сейсмических событий на производственную деятельность шахты.

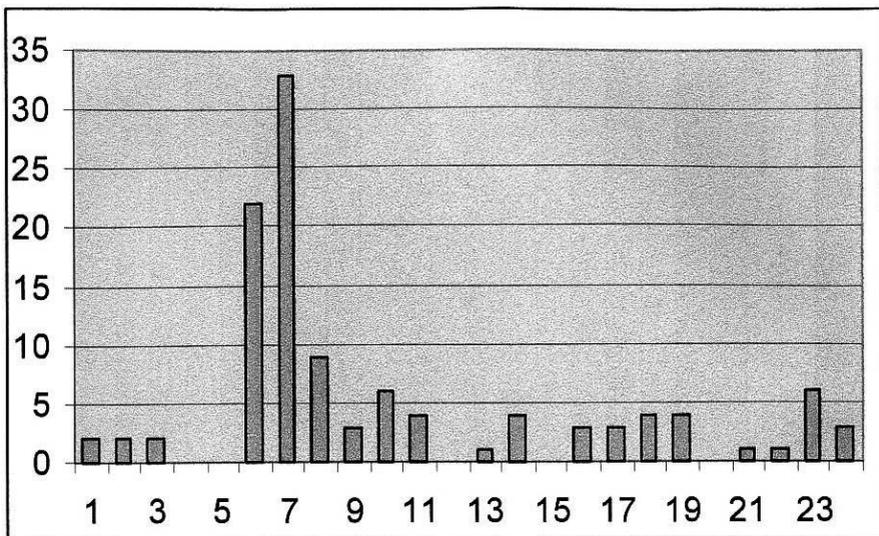


Рис. 3.70. Распределение по часам суток сейсмических событий 7 июня 2000г., которые следовали за продуктивным взрывом в 5 часов 45 мин.

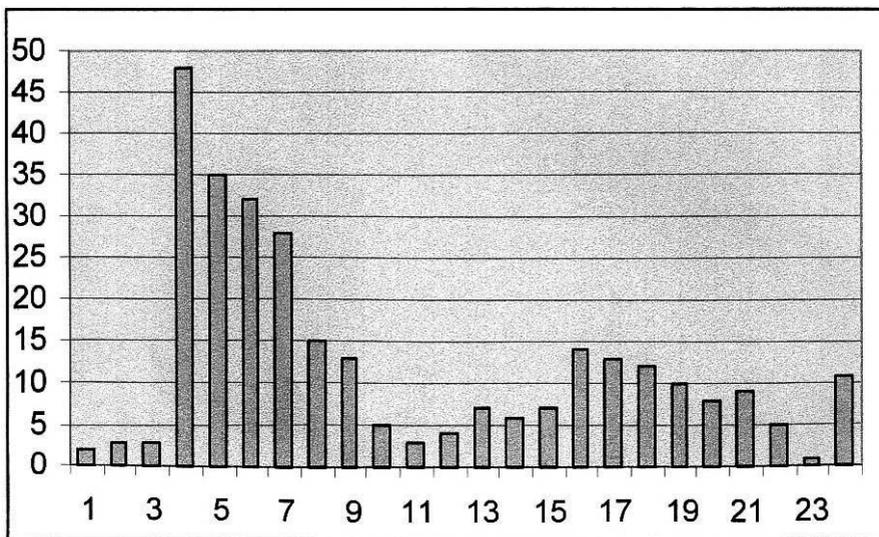


Рис. 3.71. Распределение по часам суток 17 июня 2000 г. сейсмических событий, которые следовали за внезапным выбросом пород, случившимся в 3 часа 27 мин.

3.5 Экспериментальные способы предотвращения внезапных выбросов пород

В последние годы разработаны экспериментальные способы предотвращения внезапных выбросов пород. Некоторые из них описаны далее.

Как говорилось в предыдущих главах, значительным источником геологических напряжений, а значит, сейсмических событий и внезапных выбросов пород, служат целики, оставляемые либо в качестве опор для кровли выработанного пространства, либо барьеров, отделяющих добычные горизонты или уступы друг от друга. Эти целики имеют разную форму от узких полос шириной 5 м и более неотрабатываемого рудного тела до нерегулярных блоков шириной до 30 м (рис. 3.72) и служат концентраторами напряжений. Управляемого снижения этих напряжений, кроме разгрузочного взрывания, описанного ранее, можно достичь образованием в целике узкой щели с использованием алмазной проволочной пилы или бурения близко расположенных скважин. При образовании такой щели в массиве под влиянием высоких напряжений распространяются трещины, и образуется разгруженная зона, которая в отличие от взрывания не может спровоцировать больших сейсмических событий (рис. 3.73).

Еще одним способом создания разгрузочной щели в породном массиве служит осуществление специально спланированной геометрии и последовательности добычных работ, что позволяет отделить напряженную часть шахтного поля, предназначенную к отработке, от породного массива.

Примером такого решения служат работы на шахте Creighton, Ontario, Канада (рис. 3.74). Здесь первоначально применялась выемка руды горизонтальными слоями. Затем потребовался переход к отработке уступов вертикальными слоями, однако, высокие напряжения в массиве вызывали сжатие скважин с уменьшением их диаметра до значения, не позволяющего загрузить необходимое количество взрывчат-

ки. В результате приходилось перебуривать скважины, что задерживало работы и увеличивало их стоимость.

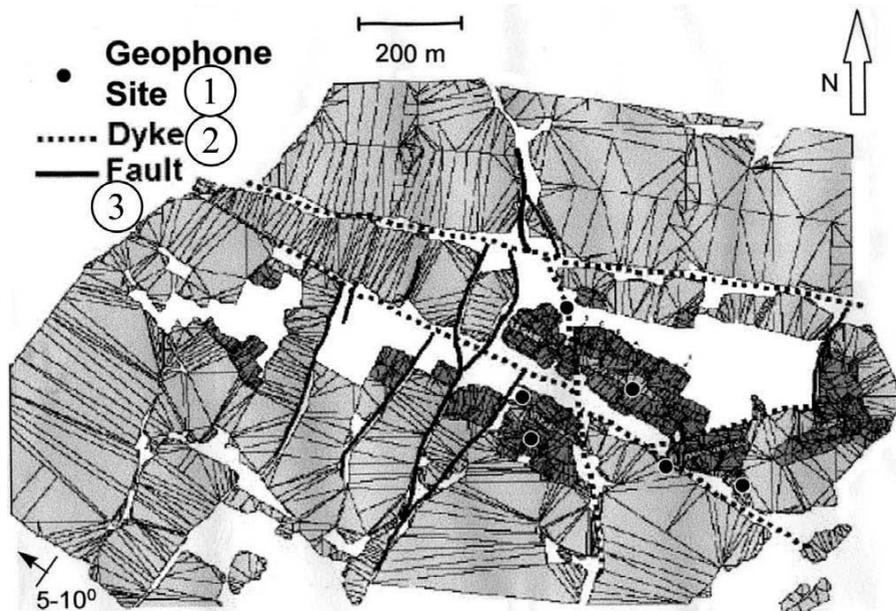


Рис. 3.72. Выявление сейсмоопасных зон месторождения Vaal 5 Shaft, связанных с нарушениями и изверженными вторжениями
*1 – места установки геофонов; 2 – изверженные вторжения;
3 – нарушения.*

Наблюдалась также концентрация напряжений по периметру выработанного пространства добычных панелей. Это объяснялось неблагоприятными геометрическими очертаниями горных работ. Такое сочетание природных и геотехнических факторов приводило к опасности появления сейсмических событий и внезапных выбросов пород.

Концептуальным решение возникших проблем было создание разгрзенной оболочки участка рудного тела, достаточной, чтобы добычные работы проводились в безопасной зоне. Реализация этой концепции проводилась между горизонтами 6600 и 6700 в блоке 4500. Высокие концентрации напряжений

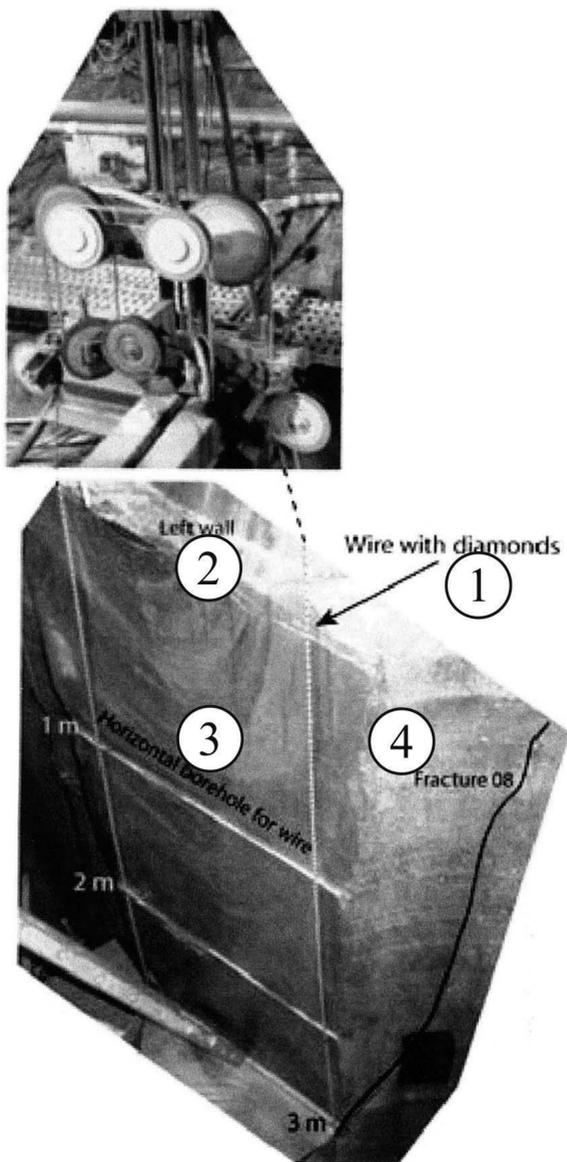


Рис. 3.73. Принцип разгрузки породного массива алмазной проволочной пилой

1 – алмазная проволочная пила; 2 – левая стена; 3 – горизонтальная скважина для пилы; 4 – трещина.

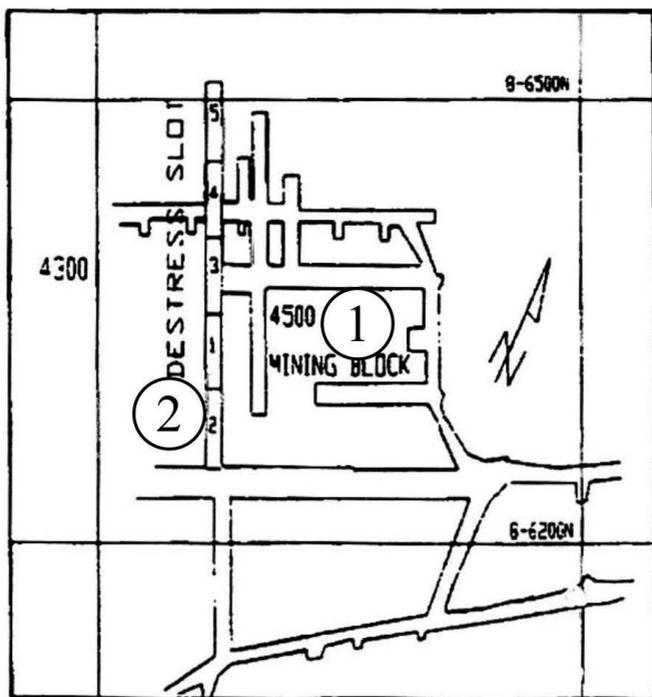


Рис. 3.74. Создание разгруженной зоны при отработке целика на шахте Creighton

1 – разрабатываемый блок; 2 – разгрузочная щель.

объяснялись наличием целика, образовавшегося при предыдущих горных работах. Главные напряжения на этой глубине составляли 63-93 МПа.

Для снижения напряжений в намеченном к отработке участке было предложено создание добычными работами разгрузочной щели, расположенной от висячего блока окружающих пород к лежащему боку. Это позволило создать зону разгрузки для последующей отработки оставленного целика.

Разгрузочная щель была образована пятью добычными уступами с размерами 6 x 14 x 43 м (высота), последовательность отработки которых показана цифрами на рис. 3.74. Разработка этих уступов подтвердила высокие напряжения по-

родных масс. Так, при обработке первой из них произошел внезапный выброс с магнитудой 3,2 по Рихтеру.

Мониторинг изменения напряжений проводился бурением скважин в разгрузочную щель из соседних выработок.

Благодаря созданию разгрузочной зоны, оставшиеся запасы руды были извлечены без внезапных выбросов и задержек добычных работ.

Еще один пример разгрузки массива от высоких напряжений при строительстве туннелей и подземных полостей показан на рис. 3.75 а. В случае с туннелем последний проходит после сооружения и под защитой параллельных ему разгрузочных туннелей малого диаметра, число которых зависит от наличия в массиве анизотропных пород. На рис. 3.75б показаны большие подземные хранилища сырой нефти, построенные в зоне, разгруженной от горного давления и защищенной от внезапных выбросов пород галереями, расположенными над главными полостями.

На стадии исследований находится предложение об инъекциях воды в геологические нарушения, что позволяет смягчить последствия скольжения по ним породных масс или вызвать такое скольжение до приближения к этим нарушениям горных работ.

Опыт южно-африканских шахт показал, что после их закрытия и затопления сейсмичность района увеличилась. Это происходило из-за влияния воды, находящейся под высоким давлением (нескольких десятков МПа), на стабильность природных и индуцированных горными работами неоднородностей массива и зон трещиноватости в нем. Вдоль плоскостей ослабленности возникало скольжение породных масс.

Подобные явления были замечены не только в горнодобывающих объектах, но также при строительстве дамб, подземных резервуаров, стимуляции нефтяных скважин, в гидротермальных полях.

С целью проверки влияния закачивания жидкости на сейсмическое поведение нарушений в поздних 1980-х гг. и

a)

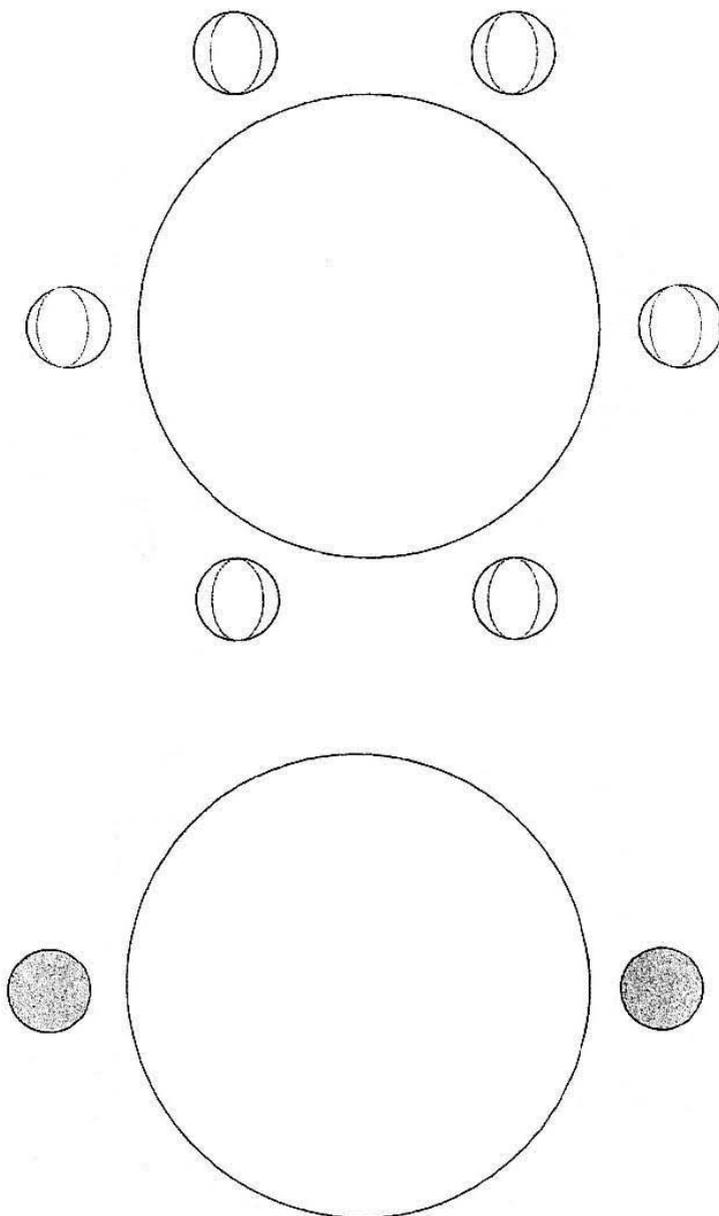
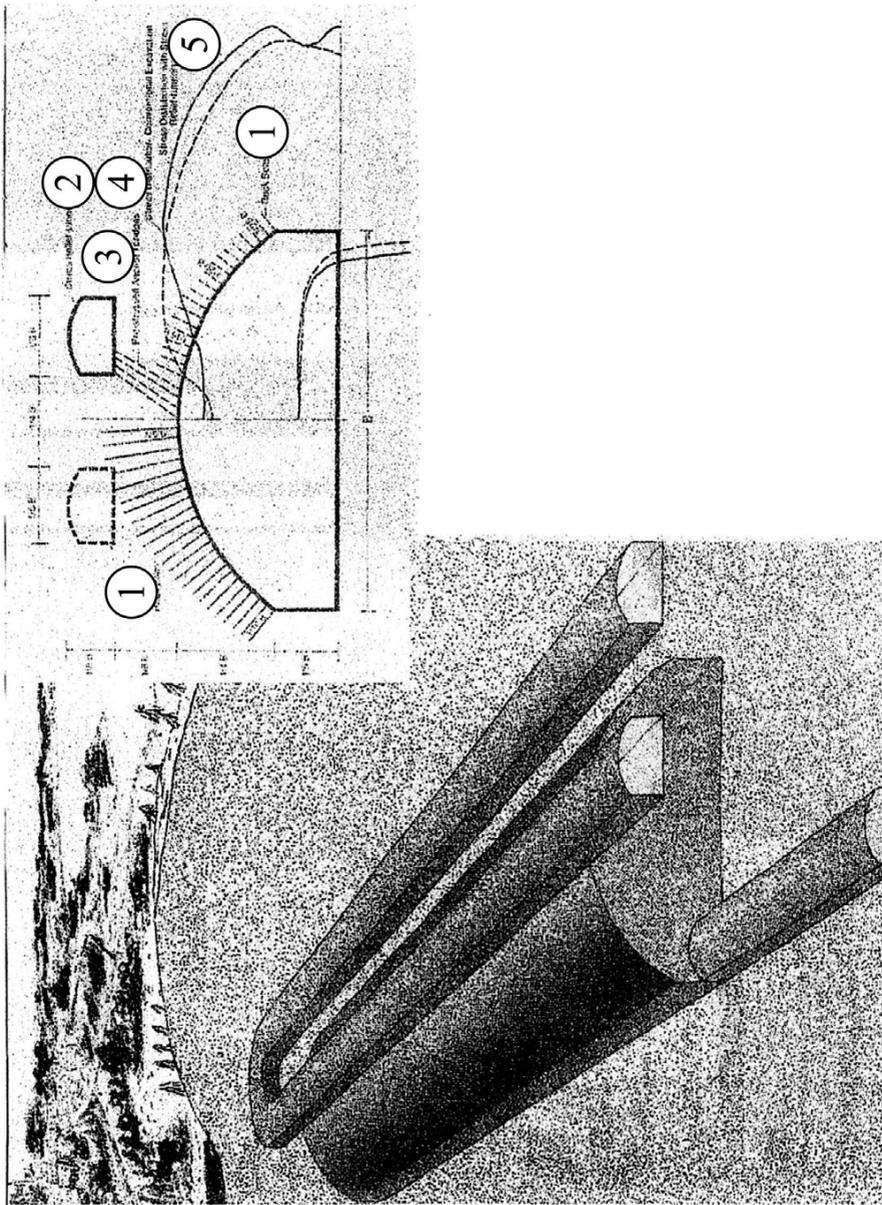


Рис. 3.75. Разгрузка подземных полостей от высоких напряжений



6)

Рис. 3.75. Разгрузка подземных полостей от высоких напряжений (окончание)

Объяснения к рис. 3.75:

а) разгрузка туннелей.

б) разгрузка хранилищ сырой нефти.

1 – анкерные болты; 2 – разгрузочный туннель; 3 – канатные анкера;

4 – распределение напряжений при традиционном строительстве;

5 – распределение напряжений разгрузочными туннелями.

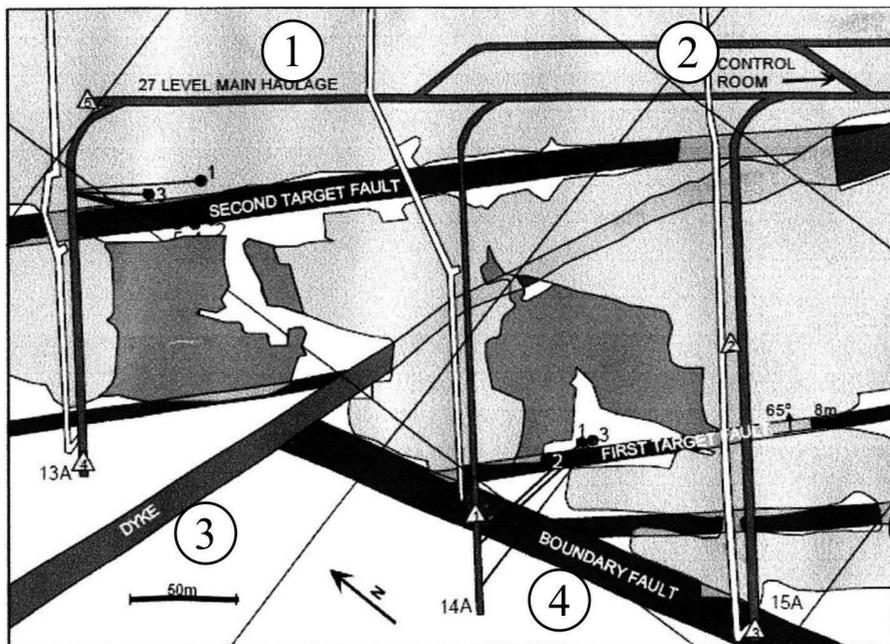


Рис. 3.76. План горных работ с расположением скважин инъецирования воды в нарушения

1 – главная транспортная выработка гор. 27; 2 – пункт управления;
3 – изверженное вторжение; 4 – нарушение.

ранних 1990-х гг. в Южной Африке был проведен ряд полевых экспериментов управления с помощью инъекций воды скольжениям пород по существующим поверхностям сброса, который имел потенциал больших (более 3 по Рихтеру) сейсмических событий. При этом надеялись также, что инъекцией воды будут индуцированы многочисленные малые собы-

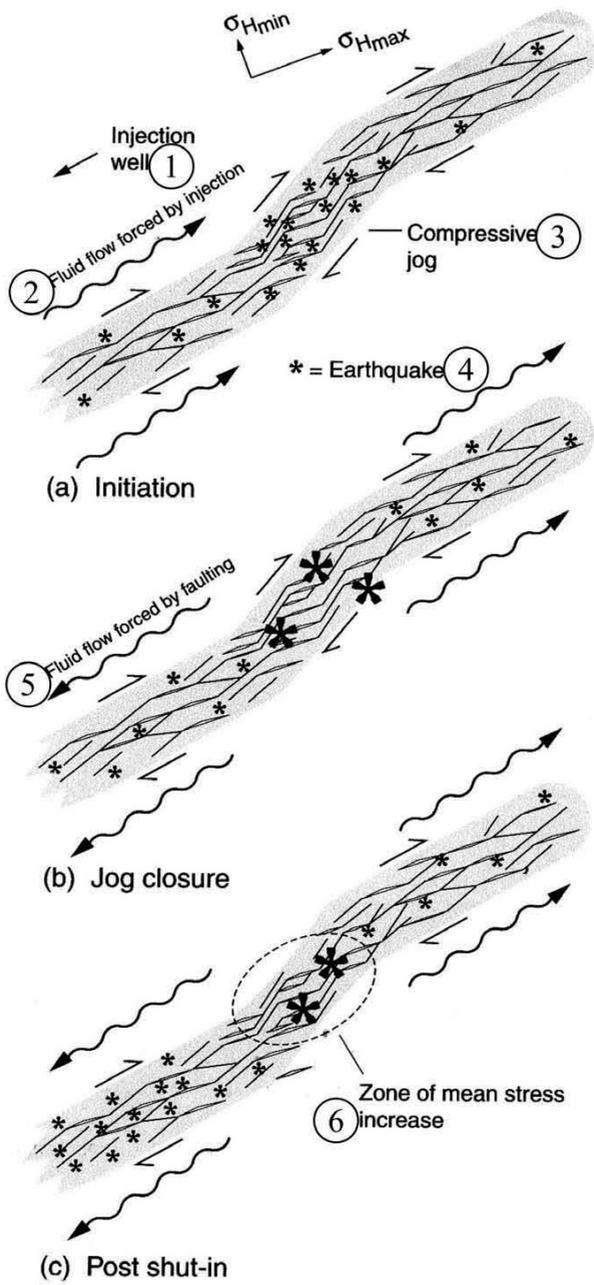


Рис. 3.77. Механизм нагнетания жидкости в нарушение

Объяснения к рис. 3.77:

а) инициация.

1 – инъекционная скважина; 2 – поток жидкости, вызванный инъекцией; 3 – сжимающее усилие; 4 – землетрясение.

в) прекращение сжатия.

5 – поток жидкости, вызванный нарушением.

с) состояние после нагнетания.

б – зона увеличения средних напряжений.

тия с магнитудой от 0 до 1 и рассеяна накопленная в результате горных работ энергия напряжений, предотвращая таким образом возникновение внезапных выбросов пород в зоне сброса.

Передвижная насосная система позволила закачивать воду с темпом 120 л/мин. под давлением до 30 МПа через частые подземные скважины, пересекающие поверхность нарушений. На рис. 3.76 показан план горных работ одной из шахт, где проводилась инъекция в два крупных нарушения. К сожалению, в течение 7 лет испытаний события с магнитудой более 0 не были зарегистрированы, но микросейсмические события с магнитудой менее 0 индуцировались много раз.

Эти и другие опыты показали, что инъекции жидкости действительно индуцируют сейсмичность в нарушенных зонах. Механизм этого явления иллюстрируется рис. 3.77. На рис. 3.78 показан дизайн бурения вертикальных скважин с поверхности в нарушенных зонах строительства лаборатории горной механики DUSEL (Deer Underground Science and Engineering Laboratory), South Dakota, США.

Следует, однако, заметить, что инъекции жидкости для снижения сейсмоопасности нарушенных зон требуют более тщательного изучения, которое могло бы более определенно устанавливать зависимость между параметрами нагнетания и уровнем сейсмичности.

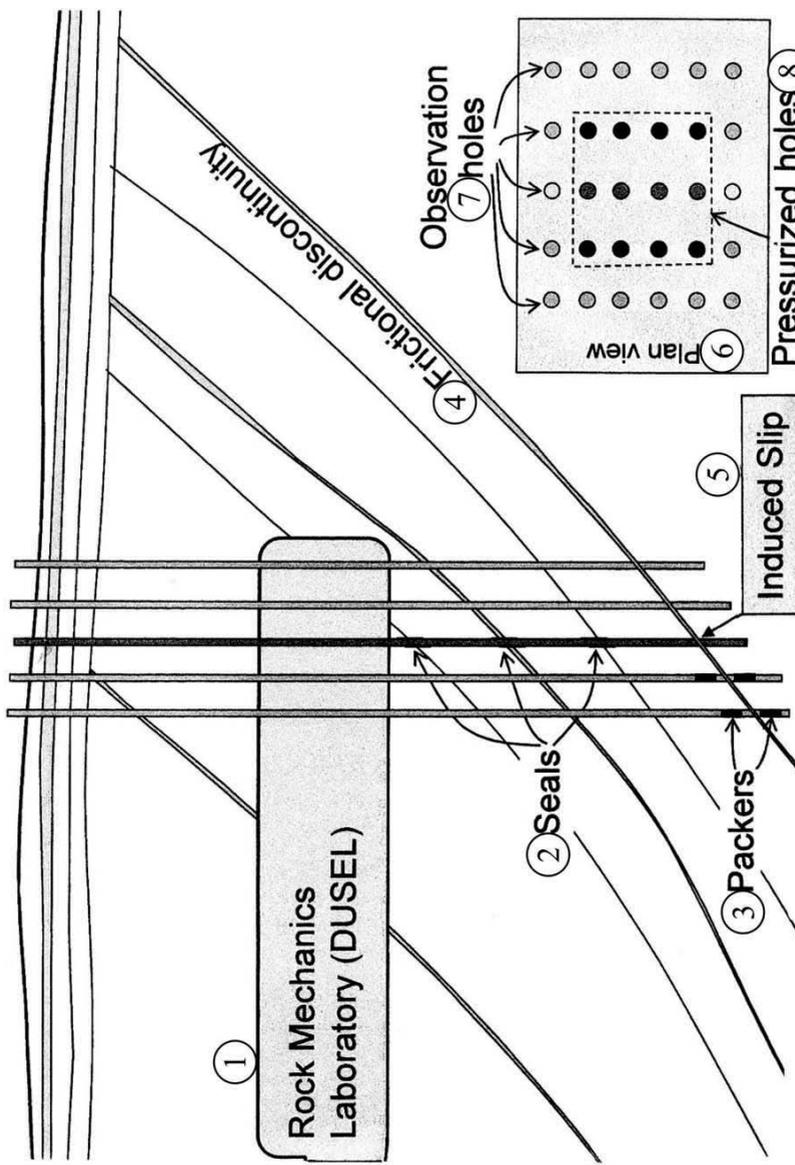


Рис. 3.78. План бурения вертикальных скважин с поверхности в нарушенные зоны строительства лаборатории DUSEL

1 – расположение лаборатории DUSEL; 2 – герметизация; 3 – уплотнители; 4 – фрикционная неоднородность; 5 – индуцированное скольжение; 6 – план; 7 – наблюдательные скважины; 8 – нагнетательные скважины.

Глава 4. Мониторинг, прогнозирование и оценка сейсмического риска внезапных выбросов пород

4.1 Общие сведения

Причиной внезапных выбросов пород являются изменения в породном массиве, вызванные подземной экскавацией и его деформациями, нарушающими природный баланс напряжений. В динамическом процессе перераспределения напряжений одна часть потенциальной энергии деформаций рассеивается, а другая аккумулируется в породных массах, неравномерно сосредотачиваясь в них, создавая растяжения, сжатия, сдвигающие усилия, а также разгружая часть породного массива, окружающего зону экскавации.

По сути внезапный выброс пород можно определить, как результат созданной нестабильности хрупких пород, вмещающих подземную полость. Наличие этих пород и высоких геостатических напряжений является внутренней причиной выбросов, тогда как внешней причиной служит экскавация пород с ее геометрическими параметрами, последовательностью работ, другими факторами, в частности, с упругой вибрацией, вызываемой взрывными работами и воздействием машин, что может спровоцировать событие выброса. Местные, внезапно возникающие концентрации напряжений, их перераспределение в окружающих породах – очень сложная динамическая процедура, нагружающая или разгружающая массив, создающая зоны сжимающих или растягивающих напряжений.

Положение и интенсивность концентрации напряжений зависит от формы и методов экскавации. Согласно имеющимся данным, выброс происходит не сразу по всему сечению полости, но в его локальной части – забое, кровле или стенах. Поэтому, если потенциальная энергия аккумулируется в окружающих породах в ходе их деформации и после трещинообразования, она достаточна, чтобы конвертироваться в кине-

тическую энергию, выталкивающую локальный породный слой в виде внезапного выброса. Его решающим фактором служит геологические характеристики пород и геостатические напряжения горного массива.

Далее рассматриваются принципиальные вопросы мониторинга сейсмической опасности в шахтах и строящихся полостях, а также предупредительные признаки высокой напряженности пород, которая может реализоваться во внезапном выбросе. Особое внимание уделено аналитическому методу оценки сейсмической активности и прогнозирования риска внезапных выбросов (на примере шахт Австралии). Его принципиальные основы могут быть использованы и в других горнодобывающих регионах, а также при строительстве крупных подземных гражданских комплексов. Методологические основы, предлагаемые описанным подходом, дадут читателю представление об оценках опасности сейсмических событий, индуцированных горными работами и потенциальных рисков, связанных с этой опасностью.

4.2 Мониторинг выбросоопасности пород

Сейсмическая технология, ранее развитая для изучения глобальных землетрясений, получила очевидное применение в исследованиях выбросов пород и сейсмичности, индуцированной горными работами. Главная часть этих исследований была направлена на выбор методов, которые могли обеспечить понимание поведения источника сейсмического события и объемную информацию об особенностях горных масс, через которые проходят сейсмические сигналы. Вытекающей отсюда целью было использовать эти знания в цифровом моделировании геотехнических процессов и дизайне крепи. Определение параметров магнитуды, частота событий и направления энергии, генерируемой источником сейсмического события, позволяет решить эти вопросы и прогнозировать тяжесть повреждений, вызываемых внезапным выбросом пород.

Особенности породных масс, идентифицируемые сейсмологическим анализом, могут быть использованы для калибровки цифровой модели и подтверждения ее результатов.

Изучение внезапных выбросов пород сосредотачивалось на двух направлениях – прогнозировании и управлении. Первое направление основывалось на мониторинге акустической эмиссии, как проявления микросейсмической активности. Его развитие началось в 1980-х гг., после разработки многоканального микросейсмического оборудования. Благодаря этому, стало возможным локализовать место сейсмического события и определить его магнитуду. Вопросы управления сейсмическими рисками выбросов пород рассматривались в предыдущей главе.

Существует три вида оборудования сейсмического мониторинга:

- сейсмографы, которые используются для регистрации землетрясений или больших внезапных выбросов пород, ощущаемых на поверхности;

- макросейсмические системы для изучения параметров сейсмического источника внезапного выброса, используемые, как правило, в исследовательских организациях;

- микросейсмические системы, используемые для регистрации малых и больших подземных сейсмических событий.

При деформации или трещинообразовании пород издаются звуки, распространяемые через массив, как упругие волны напряжений. Это явление называется акустической эмиссией. Звуки иногда находятся в диапазоне слышимости, но часто они смещаются за пределы воспринимаемых человеком длин волны или частот (рис. 4.1). Параметры звуковых сигналов во время образования и роста трещин начинают обнаруживаться в стадии, соответствующей части III кривой напряжений и деформаций (рис. 1.31).

Для того, чтобы выявить акустическую эмиссию, используются датчики, воспринимающие и передающие полученные данные компьютерной системе. С целью регистрации акусти-

ческой энергии применяются усилители, полосные фильтры, методы записи, передачи и анализа генерируемых волн.

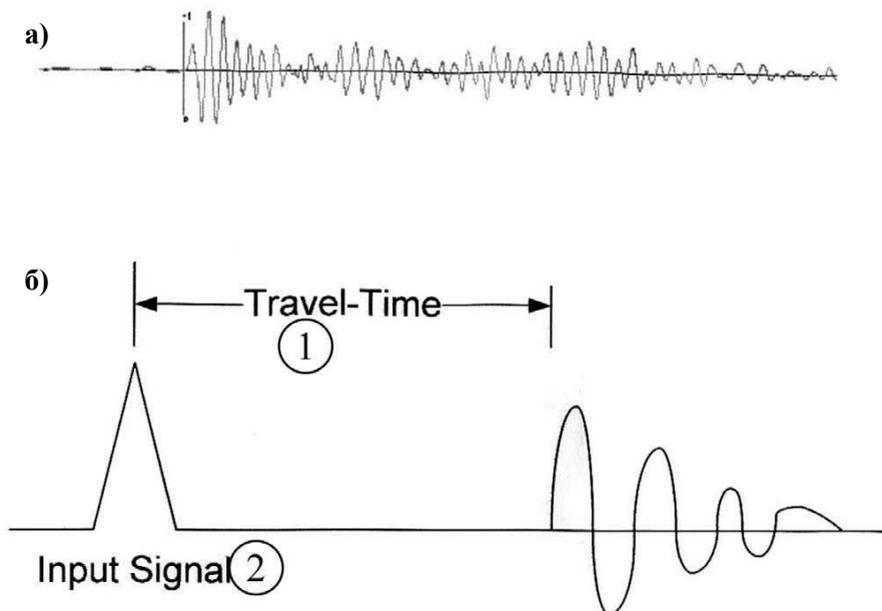


Рис. 4.1. Принцип использования акустической эмиссии для мониторинга сейсмоопасности

а) вид типичной записи акустической эмиссии.

б) механизм регистрации акустической эмиссии.

1 – продолжительность движения акустической волны; 2 – входной сигнал.

Локализация источника акустической эмиссии обычно выполняется сетью, состоящей, как минимум, из четырех датчиков, причем важным фактором является их размещение. Остальные элементы акустической системы позволяют усиливать полученный сигнал, фильтровать его от посторонних шумов, регистрировать и обрабатывать результаты исследований.

В основе методики работ лежат два главных предположения. По первому из них путь волны упругих напряжений

принимается прямолинейным, во второму – скорость распространения волны считается постоянной для конкретного рассматриваемого материала. Источник акустической эмиссии определяется знанием скорости и времени распространения волн, а также геометрией акустической сети.

Мониторинг шахт Южной Африки показал, что увеличение регистрируемого числа сейсмических событий часто предшествует возникновению внезапных выбросов пород. Так, в 17-месячном эксперименте такое увеличение сейсмической активности позволило предсказать около 80% выбросов. Однако, половина из них произошла более, чем через 4 дня после предупредительных признаков и только 27% - в пределах 24 часов.

Микросейсмический мониторинг широко используется в мировой горнодобывающей индустрии. Много усилий в этом направлении затрачено Канадой, тем не менее высокая стоимость приобретения и обслуживания оборудования делает его недостаточно доступным для малых шахт.

Другим видом мониторинга сейсмического состояния породного окружения служит геофизическая идентификация зон неоднородностей массива. Такие исследования проводятся, в частности, при строительстве туннелей, что позволяет выявить зоны геологических нарушений и потенциальных водонесущих формаций. Геофизическая разведка осуществляется сейсмическими волнами, генерируемыми малыми зарядами или специальным инструментом (рис. 4.2).

Высокочувствительными сейсмическими одно- или трехкомпонентными сенсорами регистрируются отражающиеся от неоднородностей пород волны:

- первичные (продольные) (р-волны), когда частицы среды перемещаются в сжимающемся и растягивающемся движении фронта волны;
- вторичные (поперечные) (s-волны), которые намного более медленны, чем первичные волны, но имеют сдвиговый характер.

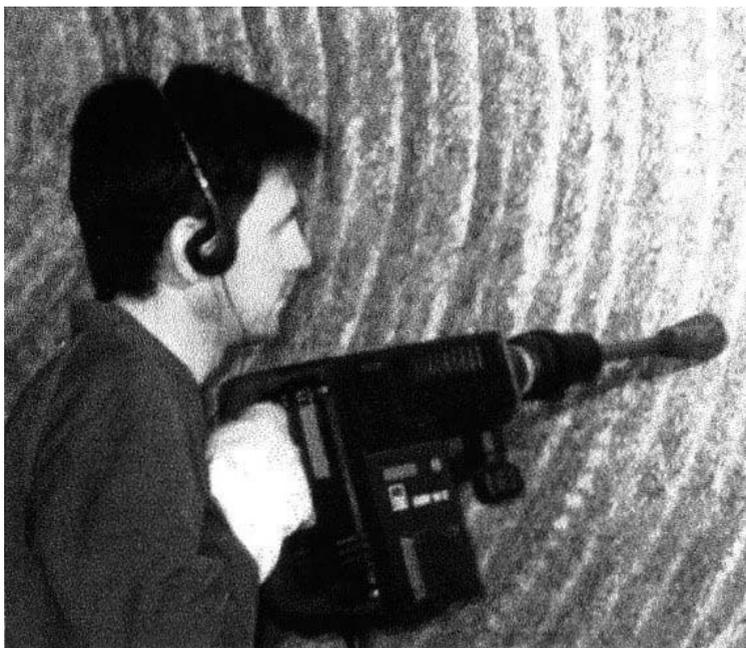


Рис. 4.2. Инструмент генерирования сейсмических волн

Примером геофизического мониторинга встречи забоем геологической неоднородности и возможного возникновения внезапного выброса может служить строительство туннеля Koralm в австрийских Альпах. Сейсмические исследования здесь выполнялись из забоя туннеля в малых специально пробуренных скважинах. Три из этих скважин бурились в породы примерно каждые 50 м подвигания забоя туннеля. Скважины имели глубину около 2 м и диаметр 42 мм. Сенсоры (геофоны или акселерометры) располагались в этих скважинах и крепились с породами зажимным механизмом. Скважины заглушались, чтобы избежать записи шума. Сейсмические сигналы генерировались малыми взрывами в скважинах, располагаемых каждые 5 м вдоль оси туннеля. Требуемая загрузка взрывчатого вещества зависела от геологических условий. Вначале определялся общий фоновый уровень шума. Систе-

ма, показанная на рис. 4.3, покрывала часть туннеля длиной 150 м тремя приемными скважинами в четырех позициях забоя, находящихся на расстоянии 50 м друг от друга.

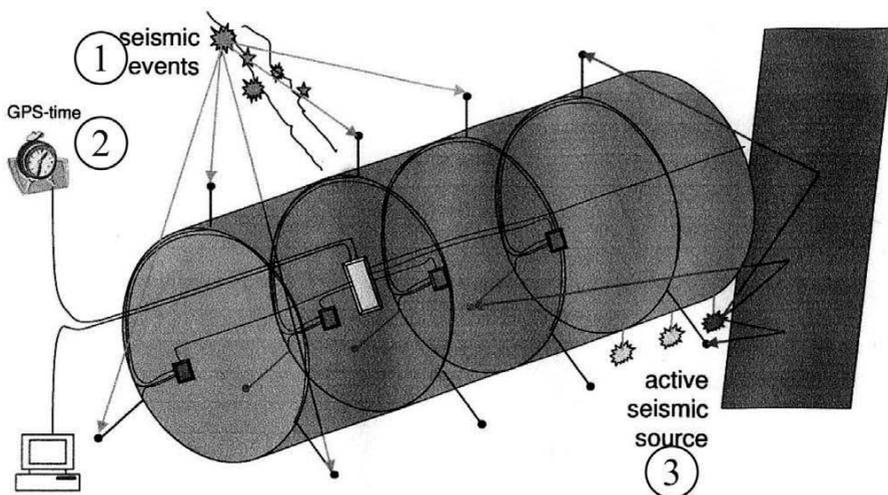


Рис. 4.3. Принцип работы геофизического мониторинга в строящемся туннеле

1 – сейсмическое событие; 2 – система GPS (глобальная система позиционирования); 3 – активный сейсмический источник.

В каждой позиции данные от трех приемников собирались и передавались в центральную систему мониторинга (рис. 4.4). По мере подвигания забоя буровой туннельной машиной или буровзрывными работами приемники устанавливались в новых скважинах. Частые измерения (без бурения) требовали около 1,5 часов. Сбор и обработка данных занимала 24 часа. Результаты мониторинга передавались в центральную систему.

Еще одним методом сейсмического мониторинга служит томография – метод, позволяющий без деструктивного вторжения в твердое тело (включая человеческое) создать объемную картину неоднородностей в толще массива. Применение томографии обычно осуществляется с помощью рентгенов-

ских лучей, широко используемых в медицине, сельскохозяйственном процессе, индустрии строительных материалов.

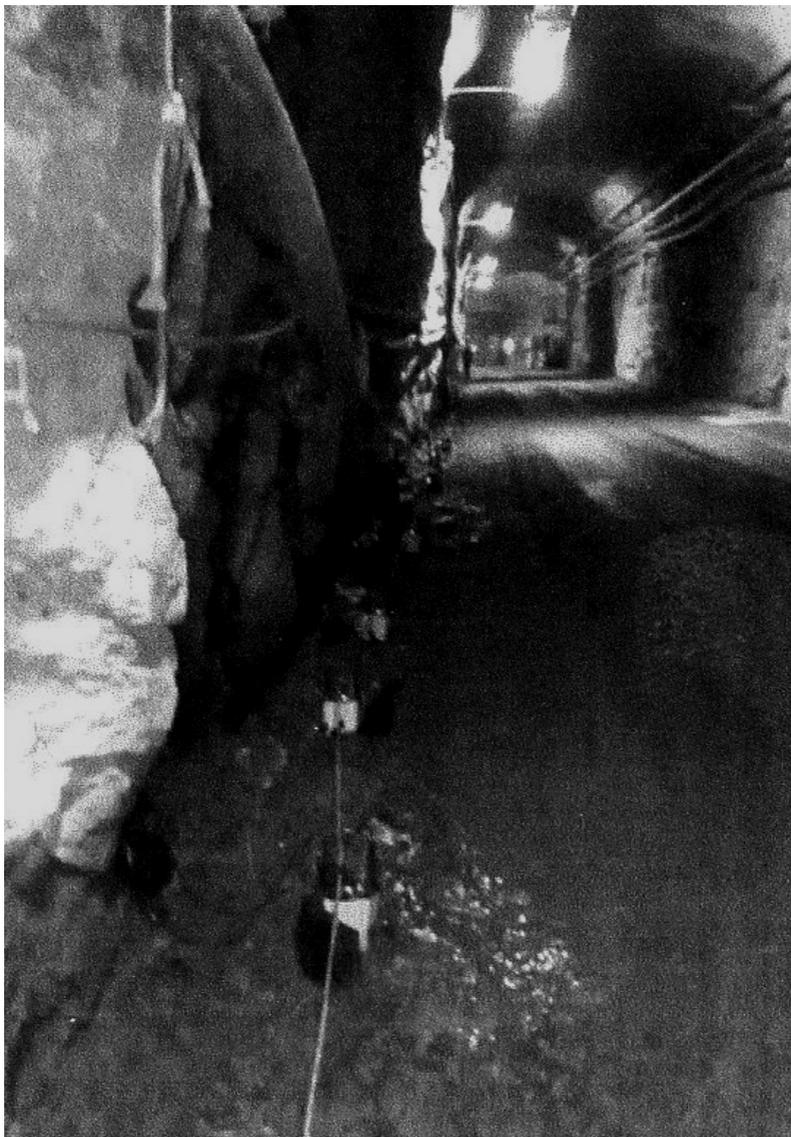


Рис. 4.4. Связь с центральной системой мониторинга

Вариант, называемый сейсмической томографией, интенсивно применяется в геологии и горном деле (рис. 4.5). В отличие от рентгеновских лучей, создание изображения внутреннего строения тела достигается анализом характеристики сейсмических волн – их дифракции, затухания, скоростей р-волны и s-волны или сочетания всех четырех параметров. Томография включает виртуальное разделение анализируемого материала на ячейки для плоскостной оценки ситуации и объемные элементы для пространственной. Время, расстояние и скорость пробега волны известны в целом, но неизвестны для каждой такой отдельной ячейки сети или объемного элемента. Расстояние, содержащееся в пределах каждой ячейки, может быть легко определено, но расчет времени и скорости пробега волны требует использования интерактивного подхода, реализуемого специальной компьютерной программой. Такой подход позволяет распределить скорость согласно изменениям материала из-за наличия в нем неоднородностей – нарушений, полостей, трещин и т.д. Определение породных зон с высокой и низкой скоростями волн позволяет отобразить внутреннюю структуру массива. Зоны с увеличенной скоростью показывают наличие высоких сжимающих напряжений из-за большой плотности структуры. Зоны с меньшей скоростью представляют аномалии массива.

Для оценки напряженного состояния пород в разные годы исследовались также такие его признаки, как выделение радона и электромагнитная эмиссия. Эти исследования, однако, не показали однозначных результатов и пока не могут быть объектами промышленного применения.

4.3 Расслоение разведочных кернов на диски

Важным признаком возможности возникновения внезапного выброса является расслоение на диски керна разведочного бурения. Такое расслоение обычно происходит на большой глубине и в крепких породах: граните, гнейсе, андезите и

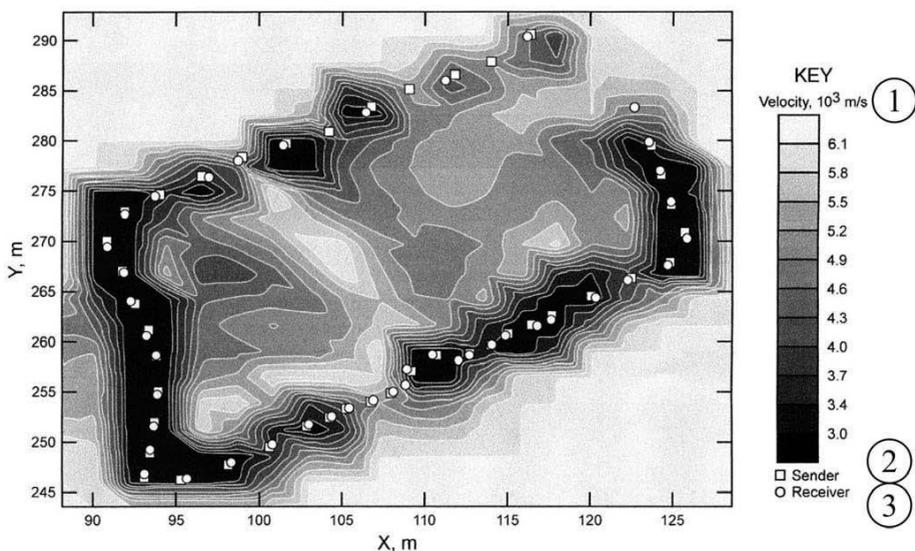


Рис. 4.5. Томограмма скорости сейсмических волн
1 – скорость; 2 – генератор; 3 – приемник.

песчанике, однако может встретиться и в других геологических условиях, где породы испытывают высокие напряжения, превышающие их прочность на растяжение и перпендикулярные оси скважины, причем, чем выше напряжение, тем на более тонкие диски происходит расслоение керна (рис. 4.6).

Примером этого явления даже в сравнительно слабых породах (вулканический туф с прочностью на осевое сжатие 2,2-10,9 МПа) и на средней глубине (около 220 м) может служить туннель Iwate, Япония длиной 25,8 км, в котором во время экскавационных работ в местах, где керны разделялись на диски, наблюдались экстраординарные деформации крепи и явления, подобные внезапным выбросам породы (рис. 4.7). Обычно в породных массах, подобных туфу, деформации контура полости происходят в виде пучения позади забоя. В случае туннеля Iwate породы периодически расщеплялись на блоки в форме плит, толщина которых была меньше 1 м. За-

тем забой обрушался подобно внезапному выбросу пород, что характерно для отрывных напряжений.

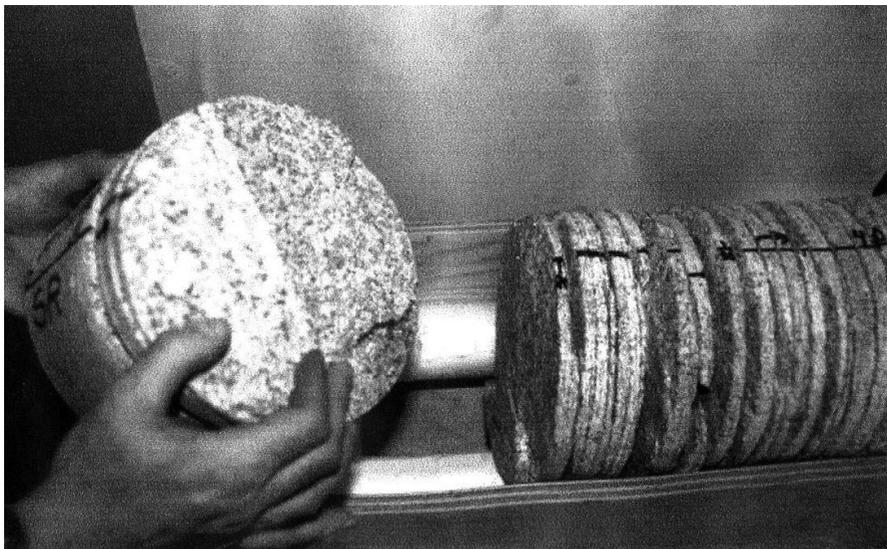


Рис. 4.6. Разделение на диски кернов разведочного бурения

Появление подобных предупредительных признаков внезапного выброса показывает необходимость принятия мер по уменьшению вероятности его возникновения, например, правильного выбора скорости подвигания забоя строящегося туннеля.

4.4 Прогнозирование возникновения и опасности внезапных выбросов пород

Внезапные выбросы пород рассматриваются, как явления динамической неустойчивости окружающих породных масс в условиях высоких геостатических напряжений. Выбросы представляют собой внезапное высвобождение потенциальной энергии напряжений породного массива. Поскольку он происходит мгновенно и интенсивно, выброс часто является

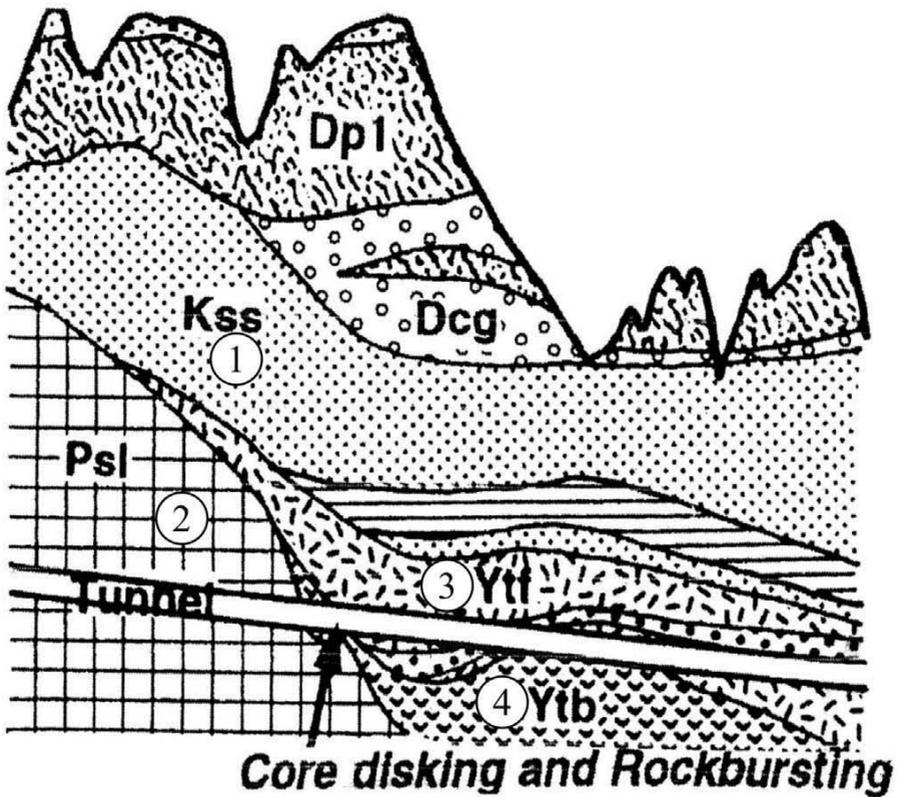


Рис. 4.7. Зона образования дисков в кернах разведочного бурения и выбросов в туннеле Jwate

1 – песчаник; 2 – отложения триаса и юрского периода; 3 – туф; 4 – туф-брекчия.

причиной травм персонала (включая смертельные случаи), повреждений оборудования и вызывает существенные задержки производственной деятельности или срыв срока строительства, приводит к экономическому ущербу.

Из-за сложности строения породных масс и влияния окружающих природных факторов прогнозирование внезапных выбросов пород в дизайне подземных проектов всегда проблематично. Общий подход к этой задаче показан на рис. 4.8.

Одним из новых методов решения этой задачи служит применение искусственной нейронной модели, позволяющей предсказать появление и интенсивность выбросов. Согласно сайту Интернета «Wapedia», (<http://wapedia.mobi/ru/%DO%98%D1%81%DO%BA%...>), «искусственные нейронные сети – математические модели, а также их программные реализации, построенные по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей нервных клеток живого организма. Искусственная нейронная сеть представляет собой систему соединенных и взаимодействующих процессоров (искусственных нейронов). Такие процессоры обычно до-

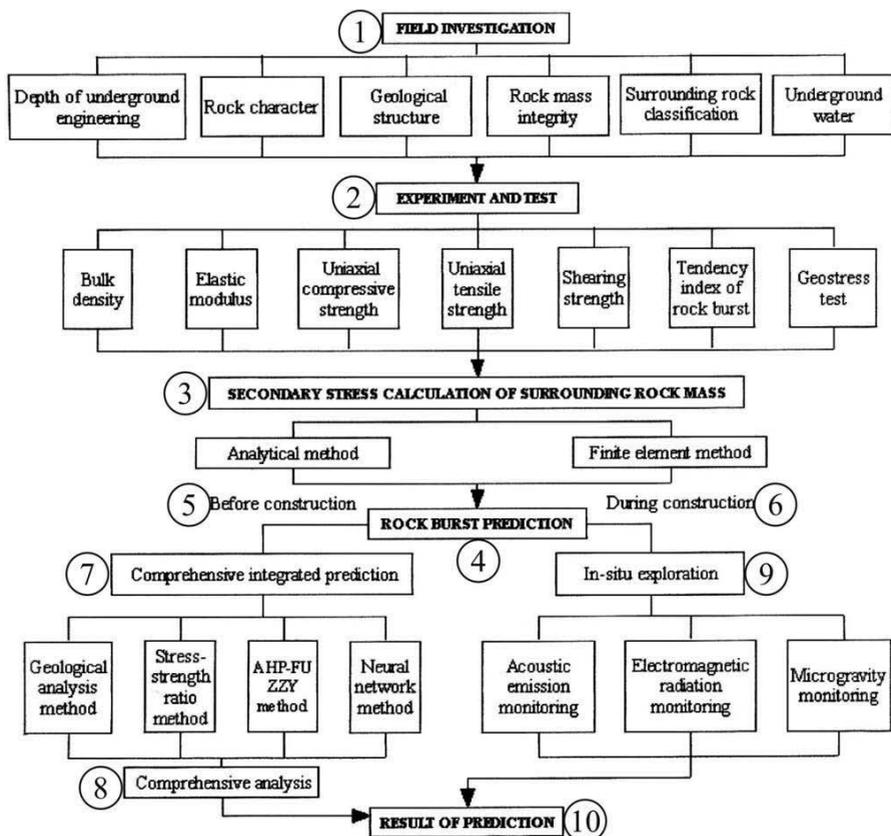


Рис. 4.8. Общий подход к прогнозированию внезапных выбросов пород

Объяснения к рис. 4.8:

1 – полевые исследования: глубина подземных работ, характеристика пород, геологическая структура, интегрированность породных масс, классификация окружающих пород, подземные воды; 2 – эксперименты и испытания: объемный вес, модуль упругости, прочность на осевое сжатие, прочность на осевое растяжение, прочность на срез, индекс тенденции к выбросу пород, испытание геологических напряжений; 3 – расчет вторичных (индуцированных) напряжений окружающих породных масс: аналитический метод, метод конечных элементов; 4 – прогнозирование внезапных выбросов пород; 5 – до строительства; 6 – в ходе строительства; 7 – полное интегрированное прогнозирование: метод геологического анализа, метод соотношения «напряжение/прочность», метод АНР – Analytical Hierarchy Process – разработка решений, основанных на структурировании альтернатив в соответствии с иерархией взвешенных критериев множественного выбора (multiple choice), метод искусственной нейронной сети; 8 – обобщенный анализ; 9 – исследования в массиве: мониторинг акустической эмиссии, мониторинг электромагнитной эмиссии, мониторинг микрогравитации; 10 – результат прогнозирования.

вольно просты, особенно в сравнении с используемым в персональных компьютерах. Каждый процессор подобной сети имеет дело только с сигналами, которые он периодически получает, и сигналами, которые он периодически посылает другим процессорам.

Нейронные сети не программируются в привычном смысле этого слова – они обучаются. Возможность обучения – одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными и выходными данными, а также выполнять обобщения».

Нейронная сеть состоит из множества функционирующих элементов, соединенных друг с другом в соответствии с

определенными правилами, способных воспринять внешнюю информацию и динамично ответить на нее.

Метод прогнозирования вероятности возникновения внезапного выброса пород с использованием искусственной нейронной сети учитывает различные значения напряжений и их сложные нелинейные отношения в породном массиве, окружающем подземную полость. Главная идея алгоритма состоит в построении схемы связей известных параметров с возможными результатами и в получении прогноза ожидаемого результата.

Подробное описание последовательности построения нейронной сети прогнозирования внезапных выбросов пород выходит за рамки данной книги. На рис. 4.9 приводится методический пример такой сети, в которой входными параметрами C служат критерии выбросоопасности. Результатами прогнозирования вероятности выбросов служат параметры: m_1 – отсутствия выбросов, m_2 – слабого выброса, m_3 – среднего выброса, m_4 – сильного выброса.

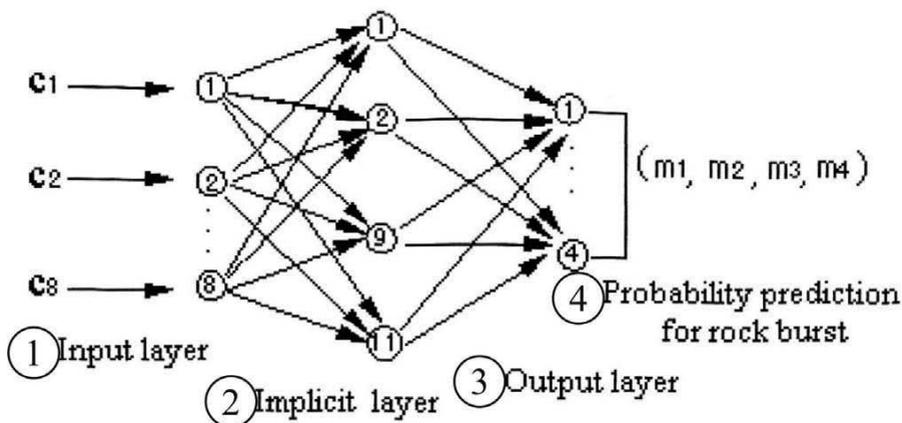


Рис. 4.9. Схема сетевой структурной модели искусственной нейронной сети прогнозирования внезапных выбросов пород
 1 – входной уровень; 2 – подразумеваемый уровень; 3 – выходной уровень; 4 – вероятность прогнозирования внезапного выброса.

При реализации искусственной нейронной сети оцениваемые факторы (критерии выбросоопасности) относятся к трем аспектам: свойства пород, условия напряжений и структурные особенности породных масс. Свойства пород включают коэффициент хрупкости C_1 (brittleness coefficient of strength), индекс тенденции к выбросу C_3 (tendency index), показатель линейной упругой энергии C_4 (linear elastic energy). Фактор условий напряжений включает коэффициент напряжений C_2 (stress coefficient), критерий Т трещиноватости пород C_6 (T criteria) и индекс напряжений C_8 (stress index). К структурным особенностям породных масс относятся классификация пород C_5 (grade of surrounding rock) и значение RQD (rock quality designation) – показатель качества пород C_7 (рис. 4.10).

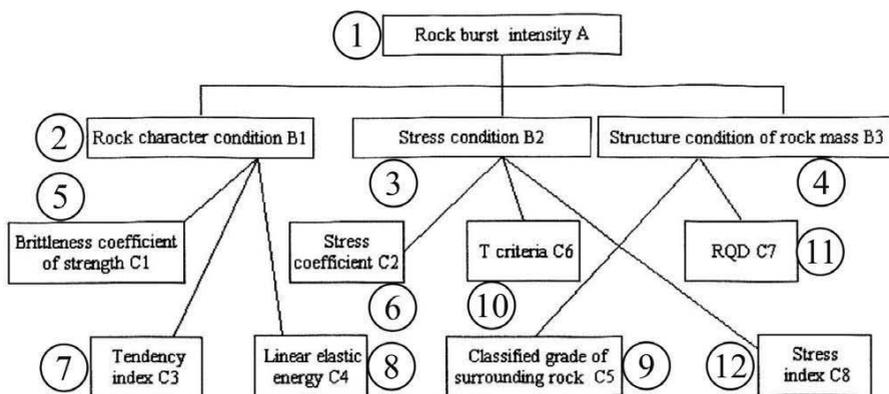


Рис. 4.10. Модель иерархической структуры для прогнозирования интенсивности внезапных выбросов пород

1 – интенсивность внезапного выброса – А; 2 – характеристика породных условий – В₁; 3 – условия напряжений – В₂; 4 – структурные условия породных масс В₃; 5 – коэффициент хрупкости С₁; 6 – коэффициент напряжений С₂; 7 – индекс тенденции к выбросу С₃; 8 – показатель линейной упругой энергии С₄; 9 – ступень классификации окружающих пород – С₅; 10 – критерий Т трещиноватости пород С₆; 11 – показатель качества пород RQD; 12 – индекс напряжений С₈.

Перечисленные факторы взаимосвязаны и взаимно ограничены. Они совместно определяют возможность выброса и его интенсивность. Но только после анализа нейронной сети можно решить, какие факторы играют главные роли и как оценить уровень их влияния на выбросы пород.

В табл. 4.1 сведены критерии оценки влияния факторов (рассчитанных методами механики горных пород) на интенсивность выброса, а в табл. 4.2 – значения этих факторов на конкретных участках длины коммуникационного туннеля гидроэлектростанции Yalong River, Китай, где для прогнозирования вероятности выбросов пород применялась искусственная нейронная сеть (табл. 4.2).

Таблица 4.1 – Критерии оценки влияния факторов на интенсивность выброса пород

Фактор	Критерии выбросоопасности	Интенсивность выброса			
		отсутствует	слабый	средний	сильный
C ₁	Коэффициент хрупкости	> 40	40-26,7	26,7-14,5	< 14,5
C ₂	Коэффициент напряжений	< 0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	> 0,7
C ₃	Индекс тенденции к выбросам	< 2,0	2,0-3,5	3,5-5,0	> 5,0
C ₄	Показатель линейной упругой энергии	< 40	40-100	100-200	> 200
C ₅	Классификация пород	-	II-III	II-I	I
C ₆	Критерий Т трещиноватости пород	< 0,3	0,3-0,5	0,5-0,8	> 0,8
C ₇	Показатель качества пород	< 0,25	0,25-0,5	0,5-0,7	> 0,7
C ₈	Индекс напряжений	< 0,15	0,15-0,2	0,20-0,25	> 0,25

Таблица 4.2 – Результаты прогнозирования вероятности выбороопасности на различных участках длины коммуникационного туннеля

Но- мера уча- стков	Маркшейдерская маркировка участ- ков	Входные параметры (критерий выбороопасности)								Результаты прогноза			
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄
1	K0+000~K0+692	24,0	0,15	1,5	145	3,0	0,25	0,76	0,14	1,000	0,000	0,000	0,000
2	K0+692~K2+500	25,2	0,45	2,4	177	2,5	0,52	0,79	0,21	0,881	0,083	0,039	0,000
3	K14+690~K15+138	24,4	0,6	3,2	196	2,5	0,71	0,89	0,27	0,7946	0,1214	0,084	0,000
4	K15+138~K16+410	25,0	0,4	3,0	189	2,5	0,49	0,79	0,19	0,8052	0,1178	0,077	0,000
5	K16+410~K17+230	23,8	0,15	2,5	181	3,0	0,27	0,69	0,15	1,000	0,000	0,000	0,000
6	K0+000~K0+485	23,7	0,15	2,5	176	3,0	0,24	0,75	0,14	1,000	0,000	0,000	0,000
7	K0+485~K1+511	23,9	0,34	3,0	179	2,5	0,49	0,81	0,19	0,748	0,172	0,080	0,000
8	K1+511~K2+480	24,1	0,41	3,1	180	2,5	0,55	0,84	0,24	0,636	0,267	0,097	0,000
9	K2+480~K4+168	24,3	0,6	3,2	191	2,5	0,73	0,87	0,27	0,7635	0,1073	0,1292	0,000
10	K14+615~K15+815	24,2	0,67	3,3	193	2,5	0,78	0,94	0,27	0,804	0,051	0,057	0,088

Применявшиеся в описанном исследовании (Tianbin Li и др.) критерии выбросоопасности, показанные в табл. 4.1, не являются единственными при изучении проблем природы и прогнозирования внезапных выбросов пород. В табл. 4.3 сведены результаты других авторов, позволяющие с разной степенью адекватности предвидеть поведение пород при создании в них полостей добычных или строящихся.

Таблица 4.3 – Критерии выбросоопасности пород

Автор	Критерий выбросоопасности	Прогноз выбросоопасности
1	2	3
L. Rusenses	$\sigma_{\theta}/\sigma_c < 0,20$ $0,20 \leq \sigma_{\theta}/\sigma_c < 0,30$ $0,30 \leq \sigma_{\theta}/\sigma_c < 0,55$ $\sigma_{\theta}/\sigma_c \geq 0,55$	выброс не ожидается слабый выброс средний выброс сильный выброс
A. Turchaninov	$(\sigma_{\theta} + \sigma_I)/\sigma_c \leq 0,3$ $0,3 < (\sigma_{\theta} + \sigma_I)/\sigma_c \leq 0,5$ $0,5 < (\sigma_{\theta} + \sigma_I)/\sigma_c \leq 0,8$ $(\sigma_{\theta} + \sigma_I)/\sigma_c > 0,8$	выброс не ожидается вероятный выброс ожидаемый выброс сильный выброс
E. Hoek	$\sigma_{\theta}/\sigma_c = \begin{cases} 0,34 \\ 0,42 \\ 0,56 \\ 0,70 \end{cases}$	легкое расслоение сильное расслоение усиленная крепь сильный выброс
N. Barton	$\sigma_c/\sigma_I = 5 - 2,5$ $\sigma_c/\sigma_I < 2,5$	средний выброс сильный выброс
Z. Tao	$\sigma_c/\sigma_I > 14,5$ $5,5 < \sigma_c/\sigma_I \leq 14,5$ $2,5 \leq \sigma_c/\sigma_I < 5,5$ $\sigma_c/\sigma_I < 2,5$	выброс не ожидается слабый выброс средний выброс сильный выброс
F. Hou	$\sigma_I < \sigma_c < 0,30$ $0,30 \leq \sigma_I/\sigma_c < 0,37$ $0,37 \leq \sigma_I/\sigma_c \leq 0,62$ $\sigma_I/\sigma_c > 0,62$	выброс не ожидается слабый выброс средний выброс сильный выброс

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3
J. Lu	$\sigma_{\theta}/\sigma_c \geq 0,3 \quad \sigma_{\theta}/\sigma_{\theta} = 0,25$ $\sigma_{\theta}/\sigma_c \geq 0,4 \quad \sigma_{\theta}/\sigma_{\theta} = 0,50$ $\sigma_{\theta}/\sigma_c \geq 0,5 \quad \sigma_{\theta}/\sigma_{\theta} = 0,75$ $\sigma_{\theta}/\sigma_c \geq 0,6 \quad \sigma_{\theta}/\sigma_{\theta} = 1,0$	выброс не ожидается слабый выброс средний выброс сильный выброс
C. Haijun	$W_{qx} < 1,5 \quad \sigma_1 < \sigma_c/\sqrt{\alpha W_{qx}}$ $W_{qx} \leq 2,5$ $\sigma_1 \leq 1,41 \sigma_c/\sqrt{\alpha W_{qx}}$ $W_{qx} \leq 3,5$ $\sigma_1 \leq 1,73 \quad \sigma_c/\sqrt{\alpha W_{qx}}$ $W_{qx} > 3,5$ $\sigma_1 > 1,73 \quad \sigma_c/\sqrt{\alpha W_{qx}}$	выброс не ожидается слабый выброс средний выброс сильный выброс

В табл. 4.3: σ_{θ} – тангенциальное напряжение;
 σ_c – прочность породы на сжатие;
 σ_t – прочность породы на растяжение;
 σ_L – литологическая составляющая;
 W_{qx} – индекс тенденции пород к выбросу;
 σ_1 – максимальное главное напряжение;
 σ_2 – среднее главное напряжение;
 $\alpha = 1 + \varepsilon^2 - 2\mu\varepsilon$, где $\varepsilon = \sigma_2 / \sigma_1$
 μ – коэффициент Пуассона.

4.5 Оценка риска сейсмической опасности на шахтах Австралии

4.5.1 Оценка сейсмической опасности

Существует два способа описания анализа и прогнозирования сейсмической активности, вызванной горными работами: вероятностный и детерминистский. Хотя возникновение «шахтотрясений» не является строго случайным процессом, вероятностный (статистический) подход к анализу сейсмиче-

ских событий дает приемлемый базис для оценки их опасности. Здесь возможно получить:

- оценку средней вероятности (во времени и пространстве) возникновения сейсмического события с определенной магнитудой;

- постоянную оценку опасности, как функцию времени или объема извлеченных пород.

Детерминистский метод прогнозирования выбросов основывается на данных, полученных на измерениях оседания кровли выработанного пространства. Метод включает рассмотрение регулярности событий, квалификацию оседания кровли, очертаний уступов, уязвимых к выбросам и данных, получаемых при возникновении события. Эта технология испытывалась несколько раз и доказала свою применимость для прогнозирования расположения, интенсивности и дня выброса в зависимости от оседания кровли выработанного пространства. Были также установлены линейные соотношения между сейсмической энергией, высвобождаемой при выбросе, общим весом руды, извлеченной при добыче, и числом выбросов.

Далее приводится описание подхода к оценке сейсмической опасности, приведенное по материалам исследований, проводившихся в Австралии.

Терминами, применявшимися в этих исследованиях, были:

- сейсмическое событие – волна краткосрочного динамического напряжения, вызванная разрушением или трещинообразованием породных масс. Сейсмическое событие ощущается, как звук (вибрация) скольжения или разрушения пород. Сейсмические события – нормальная реакция породных масс на изменение напряжений, вызванных созданием подземных полостей;

- сейсмические источники – место в породных массах, где некоторая комбинация напряжений, геологической структуры и влияния горных работ приводит к деформации или

разрушению пород, вызывая таким образом сейсмическое событие;

- механизм сейсмического источника – вид деформации или разрушения породных масс, которые вызывают сейсмическую волну напряжений. Типичный механизм сейсмического источника включает:

а) скольжение по существующим геологическим неоднородностям;

б) создание новых трещин в массиве из-за высоких напряжений или расчленения пород на несвязанные блоки;

в) разрыв при растяжении породного массива.

- сейсмическая опасность – понятие, определяемое, как вероятность возникновения событий данной величины. Не существует общепринятой меры, используемой для количественной оценки сейсмической опасности. Если вероятность сейсмических событий высока, сейсмическая опасность считается высокой и наоборот. Надежная оценка расположения зон с высокой и низкой сейсмической опасностью часто является целью сейсмического мониторинга.

- магнитуда – относительная мера силы сейсмического события, основанная на измерениях максимального перемещения пород с данной частотой колебаний, например, магнитуда Рихтера.

В шахтах с сейсмическими системами мониторинга часто технически невозможно рассчитать магнитуду Рихтера. Для описания шкалы магнитуд комбинированной локальной системой мониторинга, применяется термин «локальная магнитуда», например шкала Наттли в восточной Канаде.

В табл. 4.4 показано соотношение между примерной магнитудой по Рихтеру сейсмического события и его ощущением в шахте. Таблица составлена на основе данных, полученных в Австралии.

Сейсмические события могут быть разделены на следующие категории:

Таблица 4.4 – Соотношение между магнитудой сейсмического события и его ощущением (в шахтах Австралии)

Магнитуда	Качественное описание
1	2
-3,0	<ul style="list-style-type: none"> - малые удары и толчки, ощущаемые вблизи события; - уровень сейсмического шума нормально следует за продуктивными взрывами в напряженных породах; - событие слышится, но вибрация слишком слаба, чтобы ощущаться; - событие не определимо большинством микросейсмических систем, мониторинга.
-2,0	<ul style="list-style-type: none"> - существенное сотрясение массива; - событие ощущается, как тяжелые удары или рокот. Может ощущаться в отдалении от источника более, чем на 100 м; - событие часто определяется системами мониторинга.
-1,0	<ul style="list-style-type: none"> - событие часто ощущается многими рабочими и по всей шахте; - событие определимо микросейсмическим мониторингом; - главные сотрясения пород ощущаются вблизи источника события.
0,0	<ul style="list-style-type: none"> - ощущается вибрация по всей шахте; - удар может ощущаться на поверхности (в сотнях метров), но может не быть услышан; - вибрация ощущается на поверхности подобно генерируемой продуктивными взрывами.
1,0	<ul style="list-style-type: none"> - событие ощутимо и слышно очень четко на поверхности; - вибрация ощущается на поверхности, как продуктивный взрыв; - событие может быть определено сейсмологическими сенсорами, расположенными в нескольких сотнях метров или километрах.
2,0	<ul style="list-style-type: none"> - вибрация ощущается на поверхности сильнее, чем большой продуктивный взрыв; - геологические наблюдения обычно могут выявить источник события такой величины.

Продолжение таблицы 4.4

1	2
3,0	- событие определяется мониторингом землетрясений.
4,0	- наибольшее вызванное горными работами событие, когда-либо отмеченное в Австралии.

- малые события. Ранжируются в интервале по Рихтеру от -3 до -2. Признаки события могут быть услышаны на тихом рабочем месте, они ощущаются в виде слабых вибраций. События этого размера не определяются большинством систем сейсмического мониторинга. Рабочий, находящийся близко к источнику малого события может описать его как хлопок или удар;

- средние события. Имеют магнитуду -1 и звучат, как громкий удар или шум. Событие ощущается или слышится на расстоянии более 100 м от источника;

- большие события. Имеют магнитуду 0 и могут звучать подобно очень близкому треску или грохоту, а также выстрелу на близком расстоянии. Эти события обычно чувствуются по всей шахте и могут быть услышаны на поверхности в нескольких сотнях метров от источника. Вибрации, генерируемые сейсмическим событием с магнитудой 0 подобны вибрациям от взрывных работ;

- очень большие события. Находятся в интервале магнитуд от 1 до 2. Они определенно слышатся на поверхности и имеют эквивалент вибраций, подобный большому продуктивному взрыву. События с этой магнитудой часто определяются региональной сейсмической системой.

В Австралии наибольшее зарегистрированное событие имело магнитуду около 4,3 на шахте Kalgoorlie в ранних 1990-х гг. В Канаде наибольшее событие имело магнитуду более 4 на шахте бассейна Sudbury, в Южной Африке - магнитуда 4,4-5,2 на шахтах бассейнов Orange Free State и Klerksdorp.

В табл. 4.5 приведена частота возникновения сейсмиче-

ского события в зависимости от значения его магнитуды и сейсмической опасности.

Частота (повторяемость) сейсмических событий увеличивается экспоненциально с уменьшением магнитуды. Это означает, что на одно событие с магнитудой 1 можно ожидать 10 событий с магнитудой 0 и 100 событий с магнитудой -1, что определяется так называемым законом Gutenberg-Richter.

Сейсмическая опасность определяется, как вероятность возникновения сейсмического события данной магнитуды и может характеризоваться их частотой – повторяемостью в сутки.

В табл. 4.6 дана шкала сейсмической опасности (SHS – Seismic Hazard Scale).

Соотношение шкалы опасности события (SHS) и его магнитуды видно из табл. 4.7.

На рис. 4.11 показано соотношение шкалы опасности сейсмического события и последствий внезапных выбросов пород.

В табл. 4.8 приведена зависимость тяжести последствий выбросов от значения магнитуды события.

В табл. 4.9 описаны повреждения, вызванные внезапными выбросами пород и указаны их частоты (повторяемости) в зависимости от объема этих повреждений.

Еще одна квалификация повреждений, возникающих при внезапных выбросах пород, применяемая в Западной Австралии, показана в табл. 4.10.

Данные, приведенные в таблицах могут быть использованы при расчетах уровня сейсмического риска подземных работ.

Применение качественного или количественного подходов, основанных на прошлой сейсмической опасности, не гарантирует правильности оценки прогнозов будущих событий. Варьируемость геотехнических условий может быть настолько высока, что будущая сейсмичность окажется много больше, чем предполагается из прошлого опыта.

Таблица 4.5 – Частота возникновения сейсмического события

Шкала сейсмической опасности и качественное описание	Качественное описание	Ощущается локально	Ощущается в нескольких частях шахты подобно взрыву	Часто ощущается на поверхности или подобно продуктивному взрыву	Ощущается подобно мас-совому продуктивному взрыву	Определяется региональной сейсмической сетью
		$M_L \geq -2$	$M_L \geq -1$	$M_L \geq 0$	$M_L \geq 1,0$	$M_L \geq 2,0$
- 2	1	2	3	4	5	6
	нулевая	$> 0,001$ один раз каждые несколько лет	0 никогда не случилось	0 никогда не случилось	0 никогда не случилось	0 никогда не случилось
	очень низкая	$> 0,01$ несколько раз в год	$> 0,001$ один раз каждые несколько лет	0 никогда не случилось	0 никогда не случилось	0 никогда не случилось
0	низкая	$> 0,1$ по крайней мере ежедневно	$> 0,01$ несколько раз в год	$> 0,001$ один раз каждые несколько лет	0 никогда не случилось	0 никогда не случилось

Продолжение таблицы 4.5

Шкала сейсмической опасности и качественное описание						
1	2	3	4	5	6	
0,5	от низкой до средней	> 0,3 несколько раз в неделю	> 0,03 ежегодно	< 0,001 могло случиться однажды	0 никогда не случилось	
1	средняя	> 1 по крайней мере ежедневно	> 0,01 несколько раз в год	> 0,001 однажды каждые несколько лет	0 никогда не случилось	
1,5	от средней до высокой	> 3 несколько раз в день	> 0,03 ежемесячно	> 0,003 ежегодно	< 0,001 может случиться однажды	
21	высокая	> 10 более 10 в день	> 0,1 по крайней мере еженедельно	> 0,01 несколько раз в год	> 0,001 однажды каждые несколько лет	
2,5	от высокой до очень высокой	> 30 более 30 раз в день	> 0,3 несколько раз в неделю	> 0,03 ежемесячно	> 0,003 ежегодно	
3	очень высокая	> 100 более 100 раз в день	> 1 по крайней мере ежедневно	> 0,1 по крайней мере еженедельно	> 0,01 несколько раз в год	

Окончание таблицы 4.5

	1	2	3	4	5	6
3,5	от очень вы-сокой до чрезвычай-ной	> 300 бо-лее 300 в день	> 30 более 30 в день	> 3 несколько раз в день	> 0,3 несколько раз в неделю	> 0,03 ежемесе-чно
4	чрезвычайная	> 1000 более 1000 в день	> 100 более 100 в день	> 10 более 10 в день	> 1 по крайней мере ежедневно	> 0,1 по крайней мере еженедел-но

Рис. 4.11. Соотношение шкалы опасности сейсмического события и последствий внезапных выбросов пород

1 – шкала сейсмической опасности; 2 – высокая опасность; 3 – средняя опасность; 4 – низкая опасность; 5 – число рассмотренных случаев; 6 – чрезвычайные повреждения; 7 – очень тяжелые повреждения; 8 – тяжелые повреждения; 9 – выше-средние повреждения; 10 – средние повреждения; 11 – малые повреждения; 12 – поврежденный нет.

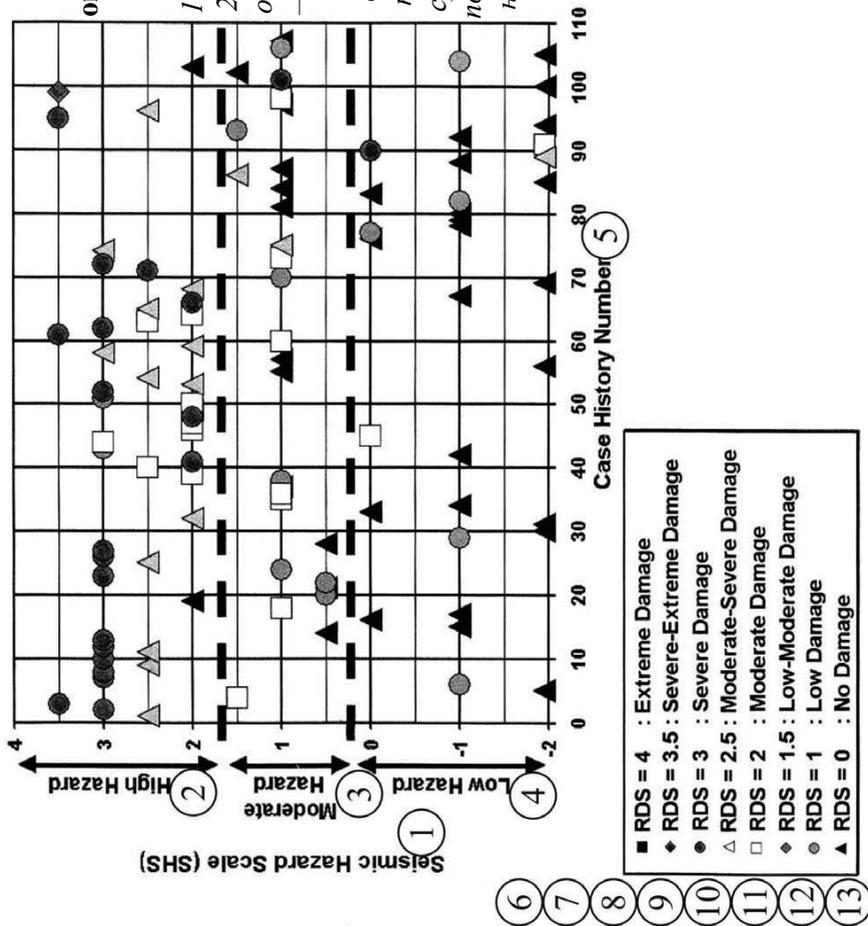


Таблица 4.6 – Шкала сейсмической опасности

Оценка сейсмической опасности (SHS)	Качественное описание	Примерная магнитуда наибольшего ожидаемого события
< -2	нулевая	$M_{Lmax} < -2,0$
$-2 \leq SHS < -1$	очень низкая	$-2 \leq M_{Lmax} < -1$
$-1 \leq SHS < 0$	низкая	$-1 \leq M_{Lmax} < 0$
$0 \leq SHS < 0,5$	от низкой до средней	$0 \leq M_{Lmax} < 0,5$
$0,5 \leq SHS < 1$	средняя	$0,5 \leq M_{Lmax} < 1$
$1 \leq SHS < 1,5$	от средней до высокой	$1 \leq M_{Lmax} < 1,5$
$1,5 \leq SHS < 2$	высокая	$1,5 \leq M_{Lmax} < 2$
$2 \leq SHS < 2,5$	от высокой до очень высокой	$2 \leq M_{Lmax} < 2,5$
$2,5 \leq SHS < 3$	очень высокая	$2,5 \leq M_{Lmax} < 3$
$3 \leq SHS < 3,5$	от очень высокой до экстремальной	$3 \leq M_{Lmax} < 3,5$
$3,5 \leq SHS < 4$	экстремальная	$3,5 \leq M_{Lmax} < 4$

Таблица 4.7 – Соотношение шкалы опасности сейсмического события и его магнитуды

Шкала опасности события (SHS)	Сейсмическая опасность	Магнитуда
-2	нулевая	-2
-1	очень низкая	-1
0	низкая	0
1	средняя	1
2	высокая	2
3	очень высокая	3

**Таблица 4.8 – Шкала последствий выбросов
(Rockburst Damage Scale - RDS)**

Оценка	Описание последствий
0	повреждений нет
1	малые повреждения
1,5	от малых до средних повреждений
2	средние повреждения
2,5	от средних до тяжелых повреждений
3	тяжелые повреждения
3,5	от тяжелых до чрезвычайных повреждений
4	чрезвычайные повреждения

Одним из первых применений результатов сейсмического мониторинга был анализ событий, происходящих сразу после шахтных продуктивных взрывов. На этой основе разработана краткосрочная (дни и недели) оценка сейсмической опасности, включающая ответы на следующие вопросы:

- где возросла сейсмическая активность?
- когда наиболее вероятно могут произойти сейсмические события?
- насколько большим может быть событие?

Главные инструменты краткосрочной оценки сейсмической опасности показаны в табл. 4.11. Здесь также приведена важность оценки опасности каждым из этих инструментов, определяемая мнением экспертов.

Далее краткие описания особенностей этих инструментов, позволяющее дать читателю общее представление о подходе к краткосрочной оценке сейсмической опасности, в том числе к такому ее проявлению, как внезапный выброс пород. Практическое применение метода связано с большим объемом исходных данных и использованием специальных компьютерных технологий.

Таблица 4.9 – Частота возникновения внезапных выбросов пород в зависимости от объема вызванных повреждений

		Частота выбросов в сутки			
Перемещенные тонны		менее 1 т	1 т - 10 т	10 т – 100 т	100 т и более
	описание повреждений	повреждения крепи, обвисание сетки, изгиб болтов	малые повреждения контура полостей, разрыв сетки, разрушение болтов	большие повреждения, разрушение многих болтов, крепь должна быть заменена	тяжелые повреждения, полная потеря крепи
Оценка последствий выброса (табл. 4.8)	Сложность восстановления	Восстановление может не потребоваться	Контур полости может быть легко восстановлен	Контур полости может быть восстановлен	Восстановление может быть невозможным или трудным
1	2	3	4	5	6
0	нулевая	< 0,001 может случиться однажды	0 никогда не случается	0 никогда не случается	0 никогда не случается
1	низкая	> 0,001 один раз каждые несколько лет	< 0,001 может случиться однажды	0 никогда не случается	0 никогда не случается
1,5	от низкой до средней	> 0,003 ежегодно	> 0,001 один раз каждые несколько лет	< 0,001 может случиться однажды	0 никогда не случается

Продолжение таблицы 4.9

1	2	3	4	5	6
2	средняя	> 0,01 несколько раз в год	> 0,003 ежегодно	> 0,001 один раз каждые не- сколько лет	< 0,001 может случиться однажды
2,5	от средней до тяжелой	> 0,03 ежемесячно	> 0,01 несколько раз в год	> 0,003 ежегодно	> 0,001 один раз каждые не- сколько лет
3	тяжелая	> 0,1 по крайней мере еженедельно	> 0,03 ежемесячно	> 0,01 несколь- ко раз в год	> 0,003 ежегодно
3,5	от тяжелых до экстре- мальных	> 0,3 несколько раз в неделю	> 0,1 по крайней мере еженедельно	> 0,03 ежемесячно	несколько раз в год
4	чрезвы- чайная	> 1 ежедневно	> 0,3 несколько раз в год	> 0,1 по край- ней мере еже- недельно	> 0,03 ежемесячно

Таблица 4.10 – Шкала классификации последствий внезапных выбросов пород

Уровень повреждений	Общая характеристика	Описание повреждений
1	2	3
0	Обстановка не изменилась	Повреждений нет
1	Полость не повреждена, но имеются признаки разгрузки	Породы показывают свежие, но малые трещины и расколы, могут быть перемещены малые фрагменты пород
2	Легкие повреждения полости. Разгруженные слои перемещаются	Слабое вспучивание стен и кровли поддерживаемой полости, перемещаются только малые свежесоблаженные породы. В поддерживаемой части полости перемещаются некоторые фрагменты пород. Возможно их поддержание сеткой. породные массы показывают только малые новые трещины.
3	Малые повреждения полости. Перемещаются и выпадают разгруженные породные слои	В неподдерживаемой полости выпадет менее 2 т пород из-за вновь образованной системы трещин или отслаивания плит. В полости, поддерживаемой только болтами и сеткой, отрываются фрагменты разного размера и иногда блоки (всего менее 1 т). Среднее провисание сетки, вызванное трещиноватостью и перемещением пород. Ясные свидетельства новой трещиноватости пород, возможно внезапное перемещение пород.

Продолжение таблицы 4.10

1	2	3
4	От средних до значительных повреждений полостей. Внезапное перемещение разгруженных и свежеразрушенных пород	В неподдерживаемой полости повреждения во многих местах. Полости, поддерживаемые только болтами и сеткой, повреждены существенным перемещением пород (более 10 т), но еще сохраняют возможность прохода. Породы сильно трещиноваты и внезапно перемещены.
5	Серьезные или тяжелые повреждения полостей. Обрушения полостей	Не поддерживаемые полости полностью закрыты. Полости, поддерживаемые только болтами и сеткой, тяжело повреждены и непроходимы. Существенное перемещение пород (более 10т). Породы тяжело разрушены.

Ни один из отдельных инструментов не является непогрешимым или универсально применимым. Сейсмическая опасность для краткосрочного анализа наилучшим образом оценивается комбинацией технологий:

1) Пространственная локализация магнитуды событий проводится на пополненных планах горных работ, включающих геологические особенности месторождения. При этом показываются существенные и большие события, поскольку от их возникновения в прошлом зависит вероятность таких событий в будущем.

2) Частотно-магнитудный анализ – фундаментальная технология оценки сейсмической опасности. Здесь устанавливаются зависимости частоты возникновения сейсмических событий от их магнитуды. Группы, включающие события, имеют относительно высокую опасность, несмотря на относительно меньшую частоту.

Таблица 4.11 – Главные инструменты краткосрочной оценки сейсмической опасности

№ п/п	Инструменты оценки опасности	Важность оценки			
		Где?	Когда?	Насколько велико?	Результативность
1.	Пространственная локализация магнитуды событий	4	2	3	4
2.	Частотно-магнитудный анализ	2	1	4	3
3.	Анализ магнитудовременной истории	2	3	4	3
4.	Анализ истории статических напряжений	2	3	2	3
5.	Отслеживание скоплений событий	3	3	4	3
6.	Карта сейсмической опасности	4	2	4	4
7.	Анализ нестабильности	2	3	2	2
8.	Суточная гистограмма частоты событий	2	2	1	2
9.	Суточный анализ	1	3	1	1

Значения оценок: 1 – бесполезность
 2 – редкая польза
 3 – успешность
 4 – наибольшая успешность

3) Анализ магнитудовременной истории, возможно один из наиболее значимых инструментов. Имеется приближенное правило определения ожидаемой наибольшей магнитуды события

$$M_{L_{\max}} = X_{\max} + (X_{\max} - X_{n-1})$$

где $M_{L_{\max}}$ - наибольшая ожидаемая магнитуда события;

X_{\max} - наибольшая магнитуда случившегося события;

X_{n-1} - вторая, следующая за наибольшей магнитуда случившегося события.

Так, если наибольшее случившееся событие имеет магнитуду +1,5, а второе за ним магнитуду +1,1, то наибольшее ожидаемое событие будет иметь магнитуду:

$$M_{L \max} = 1,5 + (1,5 - 1,1) = 1,9 .$$

Анализируются ответы на вопросы:

- увеличивают ли частоту событий взрывные работы в шахте?

- имеют ли большие сейсмические события тенденцию возникать в период общей большой частоты событий?

- происходят ли большие сейсмические события в периоды малой частоты событий?

Ответы на последние два вопроса предполагают наличие или отсутствие зависимости сейсмических событий от продуктивного взрывания в шахте.

4) Анализ истории статических напряжений позволяет определить относительное количество энергии конкретного сейсмического события и изменение напряжений с течением времени.

Во многих случаях большие сейсмические события происходят вскоре после продуктивного взрывания. Обычно сейсмические события, следующие за ним, имеют необычно высокие статические напряжения. Их история может быть использована, чтобы показать, когда происходят изменения напряжений и возрастает вероятность большого сейсмического события.

5) Отслеживание скоплений событий используется при их обзоре для четырех периодов времени:

- краткосрочных (1-3 суток);
- среднесрочных (1-3 месяца);
- долгосрочных (3 мес. – 1 год);
- весьма долгосрочных (более 1 года).

В каждом скоплении или группе сейсмических событий их ожидаемая частота рассчитывается отдельно для общего числа, чисел значительных и больших событий. Если частота событий в конкретный период времени более, чем в два раза превышает долгосрочную частоту, этот период считается опасным; если частота событий в конкретный период времени более, чем в 5 раз превышает долгосрочную частоту, этот период считается весьма опасным.

Схема влияния скопления событий на опасность ведения горных работ в выбросоопасном районе показан на рис. 4.12.

6) Карта сейсмической опасности является комбинацией трех сейсмических технологий: пространственной локализации магнитуды событий, отслеживания скопления событий, частотно-магнитудного анализа. План горных работ шахты разбивается сеткой на узлы, расположенные на расстоянии примерно 5 м друг от друга. Для шахты среднего размера обычное число таких узлов составляет несколько тысяч. Сейсмическая опасность рассчитывается для каждого узла и уточняется с возникновением нового сейсмического события.

Наибольшим преимуществом такой карты является то, что она позволяет определить зависимость сейсмической опасности от развития горных работ. Эта информация сравнивается с расположением прошлых событий и используется для определения требований к крепи и выделения событий, следующих за продуктивными взрывами.

7) Анализ нестабильности часто выполняется в шахтах Южной Африки, но редко успешно применяется в Австралии или Канаде. Он основан на оценке показателя энергии (Energy Index), который характеризует изменения напряжений. Так, резкое уменьшение показателя энергии предполагает, что произошло значительное разрушение породных масс, которое служит индикатором большого сейсмического события. Показатель кумулятивного (совокупного) объема материала (cumulative apparent value) описывает состояние накопленных

деформаций породных масс, например, потенциал высвобождения энергии в больших сейсмических событиях.

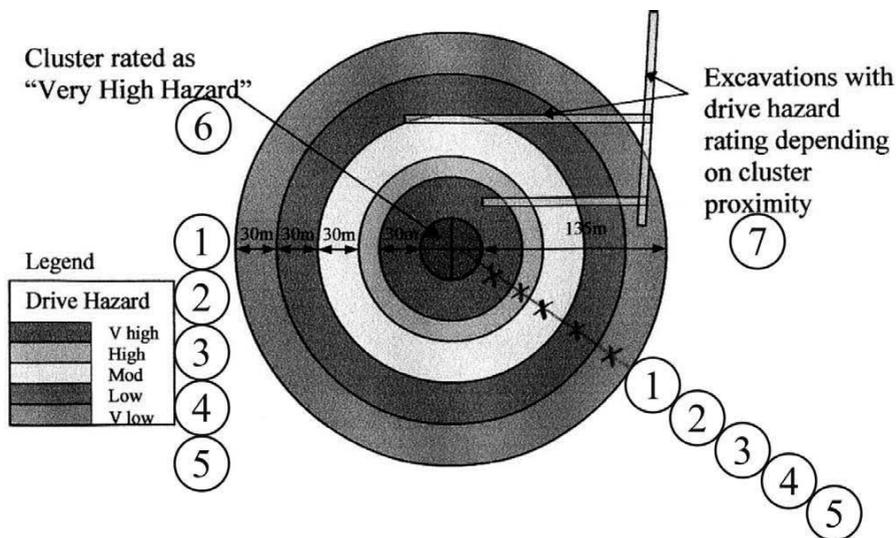


Рис. 4.12. Схема влияния скопления сейсмических событий на опасность ведения горных работ в выбросоопасном районе
 1 – очень высокая опасность; 2 – высокая опасность; 3 – средняя опасность; 4 – низкая опасность; 5 – очень низкая опасность;
 6 – скопления, оцениваемые, как очень высокая опасность; 7 – экскавация с оценкой опасности, зависящей от близости к скоплению.

Успешное использование анализа неустойчивости требует значительной степени местного опыта и наличия исходных данных. Оно полагается на высокий уровень чувствительности систем мониторинга, позволяющий, например, регистрировать событие с магнитудой менее -2,0 по Рихтеру.

8) Суточная гистограмма частоты событий помогает идентифицировать ее аномальный уровень, в частности, после продуктивных взрывов. Благодаря суточной гистограмме, пользователь может сравнить текущие суточные события с прошлыми. Обычно анализируются события за прошлые 30 дней, что дает возможность установить, например, тенден-

цию, постепенно возрастающего темпа событий и возникновения угрозы.

9) Внутрисуточный почасовой анализ может быть использован, чтобы определить, происходит ли большинство событий, как результат взрывных работ, или они независимы от продуктивных взрывов.

При проведении краткосрочной оценки сейсмической опасности, кроме рассмотрения описанных инструментов, важно также выбрать в качестве критерия наиболее вероятное или наихудшее (с самыми тяжелыми последствиями) большое сейсмическое событие. Выбор наихудшего события дает самую консервативную оценку сейсмической опасности, но она может быть чрезмерно пессимистической. Наиболее вероятное большое сейсмическое событие может быть подходящим для:

- относительно небольшого уровня развития горных работ;
- подготовительных горных работ;
- работ, поблизости от которых отсутствует уступ, где велась добыча в последние несколько месяцев.

Критерий наихудшего сейсмического события может больше подходить для:

- районов с высоким уровнем развития горных работ, т.е. вблизи больших подземных полостей и оставленных целиков;
- проведения продуктивного взрывания поблизости от оцениваемого рабочего места;
- геологических неоднородностей с прошлой неблагоприятной сейсмической историей и признаками сдвижения.

Наиболее вероятное событие может быть реалистичским критерием для районов, не испытывающих высокого уровня сейсмичности в течение длительного периода времени. В этом случае для оценки наибольшего потенциального события может быть выбран недавний период времени, например, 5 лет. Если за это время на шахте не было значитель-

ных событий, наиболее вероятное событие может быть определено с использованием частотно-магнитудного анализа данных за последние 3-4 года.

4.5.2 Оценка риска выбросоопасности пород

Риск опасности внезапных выбросов пород на шахтах Австралии оценивается следующим образом:

Сейсмический риск = Вероятность сейсмической опасности x
Потенциал повреждений x Подверженность риску

1) Вероятность сейсмической опасности, т.е. вероятность возникновения события с определенной магнитудой оценивается по шкале сейсмической опасности (SHS) (раздел 4.5.1, табл. 4.5, 4.6);

2) Потенциал повреждений, вызванных внезапным выбросом пород (Rockburst Damage Potential – RDP) (описан далее) – последствия выброса, которые являются функцией двух элементов:

- потенциала уязвимости экскавации (Excavation Vulnerability Potential - EVP), оценивающего количественную склонность экскавации к повреждениям при сейсмической опасности;

- максимальной колебательной скорости частиц (Peak Partical Velocity – PPV), выражающей сейсмическую опасность данного места.

3) Подверженность риску количественно оценивает опасность для персонала. Задачей менеджмента шахты является выбор мер, улучшающих защиту персонала, порядок возвращения в забой после продуктивного взрыва и т.д. (см. раздел 4.5.3).

Потенциал повреждений, вызванных внезапным выбросом, включает, как уже говорилось, потенциал уязвимости экскавации и максимальную колебательную скорость.

Потенциал уязвимости экскавации определяется, как функция пролета полости, параметров крепи, отношения «напряжения/прочность» пород в оцениваемом месте, наличия главных сейсмически активных структур.

Максимальная колебательная скорость определяется из фактических данных и их статистической обработки. Она может быть рассчитана по эмпирическим формулам и номограммам (см. далее).

Повреждения, вызываемые внезапными выбросами пород, существенно варьируются. Для любого сейсмического события на данном расстоянии от экскавации могут иметь место значительные колебания поврежденной зоны. Потенциальная уязвимость экскавации EVP описывает склонность подземной полости к повреждению выбросом и отвечает на вопрос, какова будет вероятность повреждений и как велики они будут, если возле экскавации происходит сейсмическое событие.

Значение EVP рассчитывается, исходя из следующих параметров:

- условия напряжений (E_1);
- несущая способность системы крепи (E_2);
- пролет экскавации (E_3);
- влияние геологической структуры (E_4).

Индекс EVP имеет два компонента:

- фактор инициации повреждений E_1/E_2 ;
- фактор глубины разрушений E_3/E_4 .

Фактор инициации повреждений объясняет параметры, способствующие динамическому разрушению породных масс, которое возникает при наличии статического напряжения массива. Применение крепи увеличивает динамическую прочность пород, уменьшая вероятность и глубину разрушения, которые определяются условиями места события.

Значение EVP рассчитывается следующим образом:

$$\text{EVP} = \text{Фактор инициации повреждений} \times \\ \text{Размер глубины разрушения} = \left(\frac{E_1}{E_2}\right) \times \left(\frac{E_3}{E_4}\right).$$

Описание каждого из этих четырех факторов приводится в плане управления сейсмическими рисками, который разрабатывается на данной шахте.

E_1 – условия напряжений определяются по формуле:

$$E_1 = 100 \frac{\sigma_{1T}}{UCS},$$

где σ_{1T} – максимальное главное напряжение (в том числе индуцированное горными работами) в рассматриваемом месте, МПа;

UCS – осевая прочность пород на сжатие, МПа.

Максимальное главное напряжение оценивается цифровым моделированием, учитывающим размеры экскавации и горнотехническую ситуацию;

E_2 – несущая способность системы крепи основывается на количестве абсорбируемой энергии (табл. 4.12) (оценивается экспертами);

E_3 – пролет экскавации, который часто имеет прямое влияние на объем разрушений и является диаметром (в метрах) наибольшего круга, который может быть очерчен внутри экскавации (рис. 4.13);

E_4 – влияние геологической структуры определяется наличием таких особенностей, как нарушения, литологические контакты, другие неоднородности массива, вызывающие его обрушение (табл. 4.13).

Индекс EVP не определяет магнитуду и вероятность возникновения сейсмического события, вызывающего повреждения. Он также не рассматривает расстояние от источника события до места повреждений, но показывает, что существует значительная динамическая нагрузка на экскавацию (такая, что может произойти внезапный выброс пород), а также, что имеется зависимость между ним (индексом EVP) и объемом повреждений, вызванных выбросом.

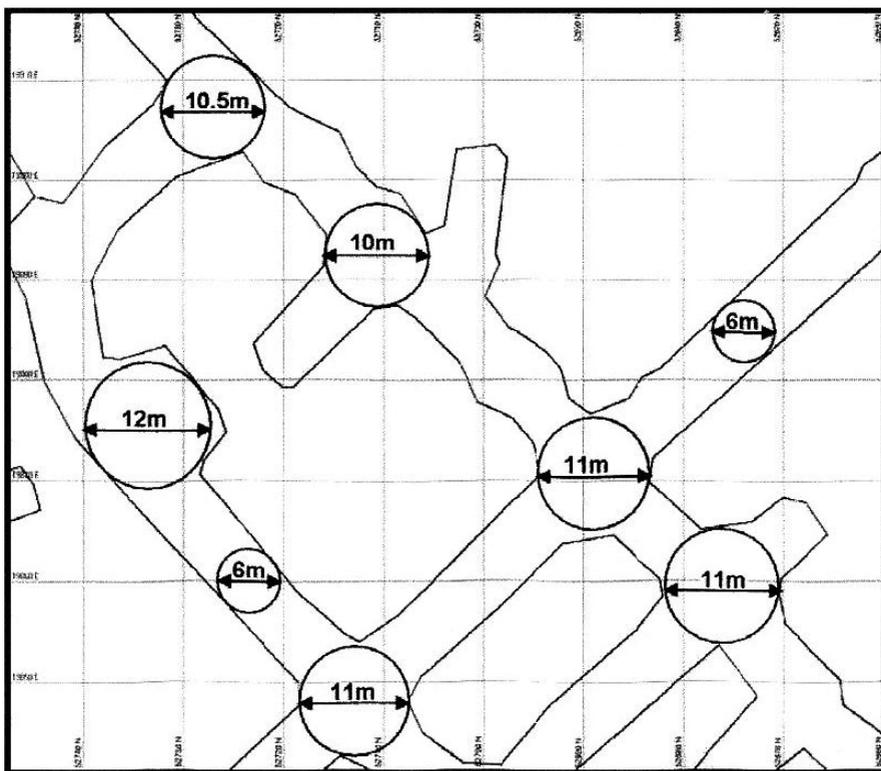


Рис. 4.13. Большие пролеты подземной экскавации

Для определения вероятных магнитуды и расстояния до источника сейсмического события, ответственного за внезапный выброс пород, индекс EVP должен быть соединен с показателем максимальной колебательной скорости PPV , генерируемой сейсмическим событием.

Максимальная ожидаемая скорость PPV определяется из фактических данных или как функция магнитуды и расстояния от источника сейсмического события:

$$PPV = 1,4 \frac{10^{\frac{M}{2}}}{R}, \text{ м/сек.},$$

где M – магнитуда сейсмического события;

R – расстояние от источника сейсмического события до места оценки PPV , м

Для сейсмических событий, индуцированных в шахтах Южной Африки и подобных им, значение PPV может быть определено из выражения:

$$\log \cdot (PPV) = 3,95 + 0,57M_L - \log \cdot (R), \text{ см/сек.}$$

Зависимость PPV от магнитуды и расстояния показана на рис. 4.14 и в табл. 4.14.

Таблица 4.12 - Оценка фактора несущей способности крепи

Крепь внутренней поверхности полости	Усиление массива	Оценка E_2	Пример
Нет	Болты с расстоянием между ними более 1,5 м	2	Болты с продольной щелью или арматурные стержни
Сетка или набрызгбетон	Болты с расстоянием 1-1,5 м	5	Болты с продольной щелью или арматурные стержни с сеткой или набрызгбетоном толщиной 50 мм
Сетка или набрызгбетон	Болты с расстоянием менее 1,0 м	8	Болты с продольной щелью и сеткой или набрызгбетоном толщиной 50 мм. Дополнительная установка арматурных стержней
Сетка или набрызгбетон	Болты или канатные анкера	10	Болты с продольной щелью и или арматурные стержни с сеткой или набрызгбетоном толщиной 50 мм или армированный набрызгбетон плюс канатные анкера
Динамическая крепь	Динамическая (податливая) крепь	25	Динамическая (податливая) крепь, например, конусные болты или Digabag с динамической характеристикой сопротивления

Таблица 4.13 – Влияние геологических структур

Е ₄	Описание
0,5	Сейсмически активные главные структуры: нарушения, разрывы, дискретные контакты
1	Неблагоприятные породные массы. Ориентация неоднородности породных масс способствует разрушениям. Оценка применяется, когда обрушения пород больше ожидаемых
1,5	Породы представляют собой массив без выраженных структур. возможно трещинообразование при взрывных работах. Неоднородности (нарушения, срезы) отсутствуют

Таблица 4.14 – Зависимость PPV от магнитуды события и расстояния от его источника

PPV, мм/сек.	Степень повреждений	Примерное расстояние от источника события до места оценки PPV, м		
		M _L = 2,5	M _L = 1,5	M _L = 0,5
PPV < 50	нет повреждений	> 700	> 150	> 75
50 < PPV < 300	падение или обрушение пород	75-700	30-150	3-75
300 ≤ PPV ≤ 600	падение пород	45-75	15-30	рядом с зоной источника
PPV > 600	тяжелые повреждения	< 45	< 15	в пределах зоны источника

Комбинация двух параметров EVP и PPV называется потенциалом повреждений RDP, вызванных внезапным выбросом:

$$RDP = EVP \times PPV.$$

Шкала повреждений, вызванных выбросами пород приведена в табл. 4.15.

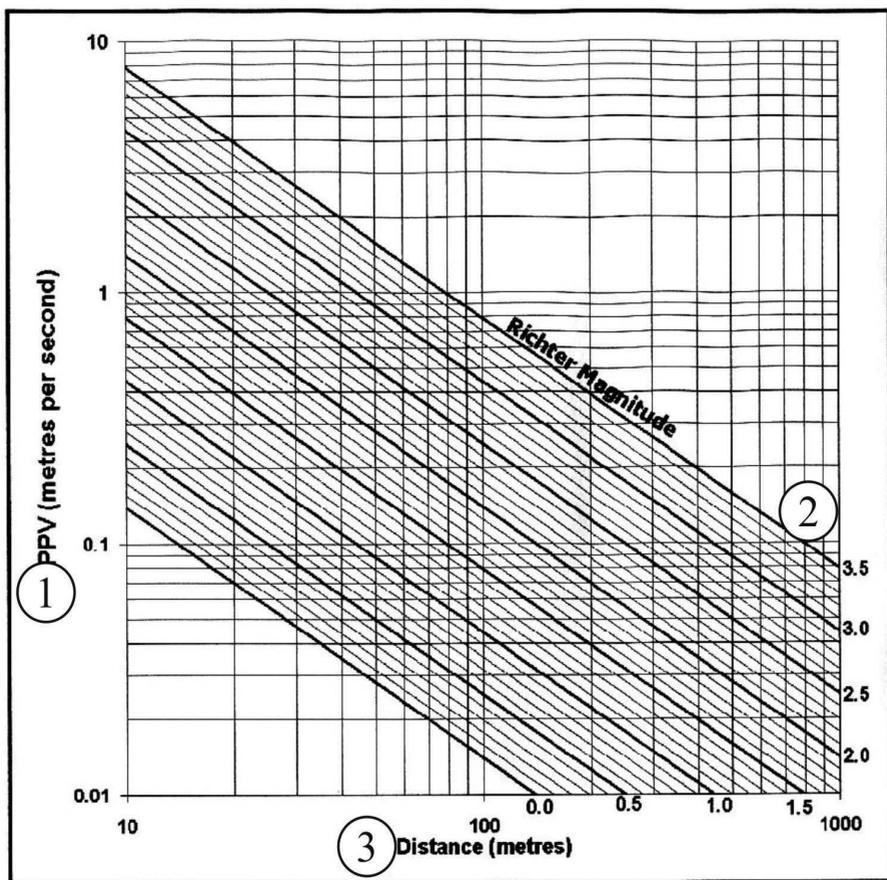


Рис. 4.14. Зависимость максимальной ожидаемой скорости PPV от магнитуды события и расстояния до источника
 1 – PPV, м/сек.; 2 – магнитуда; 3 – расстояние от источника.

Планом управления рисками предусматривается построение карт потенциальных повреждений (рис. 4.15), где разными цветами (на черно-белом рисунке - цифрами) показывают участки шахты с разными уровнями повреждений (табл. 4.16).

Таблица 4.15 – Шкала повреждений, вызванных выбросами пород

Шкала повреждений	Повреждения породных масс	Повреждения крепи
R ₁	Повреждений нет/минимальное ослабление	Повреждений нет
R ₂	Малые повреждения, перемещено 2 т пород	Система крепи нагружена, провисание сетки, деформация опорных плит
R ₃	Перемещены 1-10 т	Разрушены некоторые болты
R ₄	Перемещены 10-100 т	Большие повреждения крепи
R ₅	Перемещены более 100т	Полное разрушение крепи

В табл. 4.17 для рассмотренных случаев сейсмических событий (в Австралии) сведены факторы, влияющие на число внезапных выбросов и оценку их последствий, в табл. 4.18 – влияние нарушений на сейсмическую опасность и уровень повреждений. Кроме приведенных факторов важное значение имеют также ширина добычных уступов, процент извлечения руды, размеры и запасы рудного тела, степень развития горных работ.

Таблица 4.16 – Обозначения участков шахты с различными уровнями повреждений

Цифровые обозначения	Значения RDP	Уровень повреждений
1	Вне оценки	Нет данных
2	0-25	R ₁
3	25-50	R' ₁
4	50-130	R ₂
5	130-170	R ₃
6	170-230	R ₄
7	> 230	R ₅

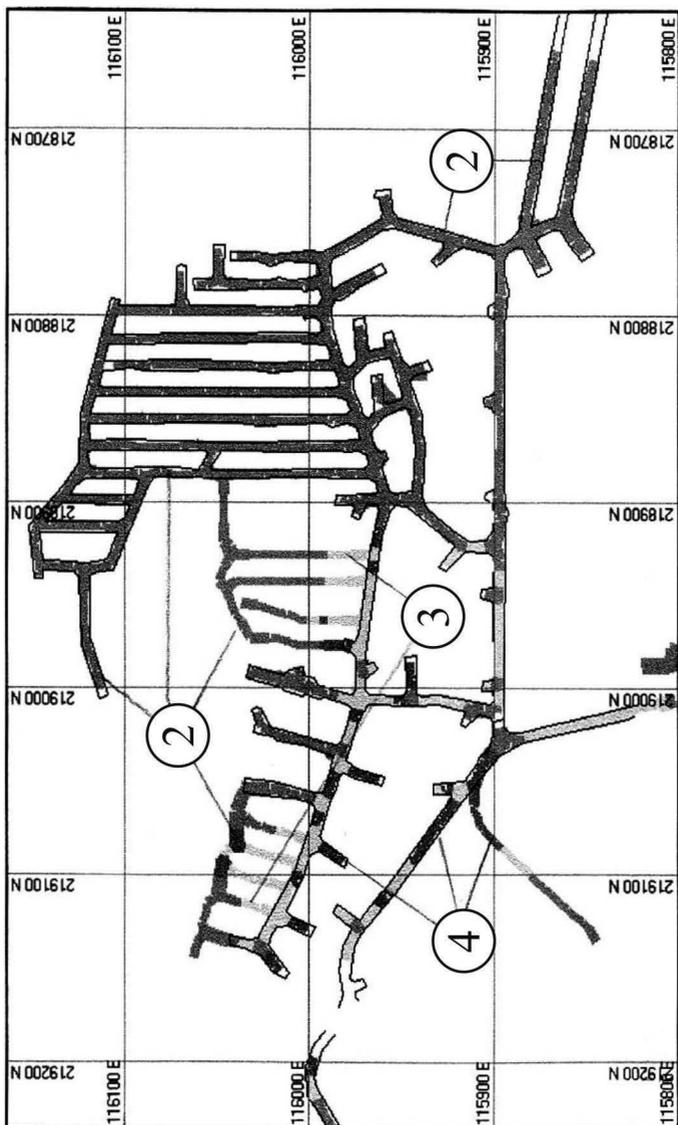


Рис. 4.15. Карта потенциальных повреждений
 Обозначения позиций соответствуют табл. 4.1б.

Таблица 4.17 – Факторы, влияющие на число внезапных выбросов и оценку их последствий

		Оценка по шкале последствий выбросов, RDS (табл. 4.8)					
		Число случаев/общее число случаев (проценты)		Высокая оценка последствий RDS ≥ 2			
Факторы	Значения факторов	Низкая оценка последствий RDS ≤ 0		Средняя оценка последствий 0 < RDS < 2			
		15/30	50%	6/30	20%	9/30	30%
Глубина, м	< 500	15/30	50%	6/30	20%	9/30	30%
	500-1000	12/59	20%	19/59	32%	28/59	48%
	1000-1500	4/10	40%	4/10	40%	2/10	20%
	1500+	0/7	0%	0/7	0%	7/7	100%
Прочность пород на осевое сжатие, МПа	< 100	9/11	82%	1/11	9%	1/11	9%
	100-130	6/18	33%	11/18	61%	1/18	6%
	130-200	17/58	29%	9/58	16%	32/58	55%
	> 200	1/18	6%	8/18	44%	9/18	50%
	Всего	33/105	31%	29/105	28%	43/105	41%
Существующее до горных работ главное горизонтальное направление, МПа	< 30	13/22	59%	4/22	18%	5/22	23%
	30-60	17/58	29%	14/58	24%	27/58	47%
Отношение главного горизонтального напряжения к осевой прочности пород	60+	0/24	0%	11/24	46%	13/24	54%
	< 0,2	11/33	33%	9/33	27%	13/33	40%
	0,2-0,33	9/33	27%	9/33	27%	15/33	46%
	0,33-0,5	6/22	27%	6/22	27%	10/22	46%
	> 0,5	6/16	38%	5/16	31%	5/16	31%

Таблица 4.18 – Влияние нарушений на уровни сейсмической опасности и повреждений при выбросах

Нарушения и перемещения массива после начала горных работ	Число случаев					
	Уровень сейсмической опасности SHS		Уровень повреждений RDS		Высокий RDS ≥ 3	Средний RDS < 3
	Низкий SHS ≤ 0	Средний 0 < SHS < 2	Высокий SHS ≥ 2	Низкий RDS < 2		
Замеченные нарушения отсутствуют	8/18 (45%)	4/18 (22%)	6/18 (33%)	11/18 (61%)	3/18 (17%)	4/18 (22%)
Малые нарушения с неизвестным перемещением	5/15 (33%)	4/15 (27%)	6/15 (40%)	7/15 (47%)	5/15 (33%)	3/15 (20%)
Малые нарушения с некоторым перемещением	8/21 (38%)	3/21 (14%)	10/21 (48%)	7/21 (33%)	7/21 (33%)	7/21 (33%)
Общешахтные нарушения с неизвестным перемещением	7/27 (26%)	11/27 (41%)	9/27 (33%)	17/27 (63%)	9/27 (33%)	1/27 (4%)
Общешахтные нарушения с некоторым перемещением	4/24 (14%)	7/24 (29%)	13/24 (54%)	9/24 (38%)	8/24 (33%)	7/24 (29%)
Всего	32/105 (30%)	29/105 (28%)	44/105 (42%)	51/105 (49%)	32/105 (30%)	22/105 (21%)

Таблица 4.19 – Результаты управления сейсмичностью и выбороопасностью

	Результаты безуспешны		Случайный или нерегулярный успех		Регулярный или постоянный успех		Не признается или нет данных
	1	2	3	4	5	6	
Улучшенная безопасность	1/42	2%	5/42	12%	36/42	86%	31
	0/37	0%	9/37	24%	28/37	76%	36
	2/48	4%	6/48	13%	40/48	83%	25
Понимание сейсмичности шахты	8/35	23%	8/35	23%	19/35	54%	38
	1/43	2%	15/43	35%	27/43	63%	30
	1/49	2%	13/49	27%	35/49	71%	24
	2/41	5%	19/41	46%	20/41	49%	32
	17/29	59%	12/29	41%	0/29	0%	44

Продолжение таблицы 4.19

	1	2	3	4	5	6	7	
Изменение дизайна шахты и параметров добычи	Изменение практики продуктивного взрывания	3/32	9%	18/32	56%	11/32	34%	41
	Изменение геометрии подготовки	2/32	6%	15/32	47%	15/32	47%	41
	Изменение геометрии и последовательности добычи	4/36	11%	15/36	42%	17/36	47%	37
	Разгрузка напряжений для уменьшения сейсмичности	4/26	15%	6/26	23%	16/26	62%	47
Использование восстановительных мер	Применение крепи с динамическим сопротивлением	1/23	4%	10/23	43%	12/23	53%	50
	Разгрузочное взрывание при подготовительных работах	4/13	31%	4/13	31%	5/13	38%	60
	Разгрузочное взрывание при добычных работах	6/16	38%	5/16	31%	5/16	31%	57

В табл. 4.19 показаны результаты управления сейсмичностью и выбороопасностью, в табл. 4.20 – результаты управления рисками сейсмичности.

Таблица 4.20 – Результаты управления сейсмическими рисками

	Результаты безуспешны		Случайный или нерегулярный успех		Регулярный или постоянный успех		Не применяется или нет данных
Идентифицированный и модифицированный риск дизайна и добычи	1/33	3%	14/33	42%	18/33	55%	40
Идентификация локальности высокого риска	3/26	12%	9/26	35%		53%	47
Минимизация остановок работ знанием локализации событий сейсмически активных зон	1/28	4%	6/28	21%	21/28	75%	45
Прекращение добычи в зонах высокого риска	1/27	4%	9/27	33%	17/27	63%	46

Подверженность риску – финальный компонент оценки сейсмического риска. В табл. 4.21 приведен пример матрицы оценки риска, полученный объединением количественной оценки подверженности риску (по вертикали) (см. далее) и потенциала повреждений (по горизонтали). В таблице приведены качественные оценки риска:

VL – very low – очень низкий;

L – low – низкий;

Таблица 4.21 – Примеры матрицы оценки сейсмического риска

Вид производственной деятельности	Подверженность риску	RDP							
		< 25	25-65	65-115	115-170	170-225	225-280	> 280	
		Вероятности R ₄ , R ₅							
		< 0,05	0,05-0,1	0,1-0,25	0,25-0,5	0,5-0,75	0,75-0,9	> 0,9	
Доступ в выработку запрещен	100	VL	VL	L	M	M	H	H	H
Выработка вне актив-ных работ	1000	VL	L	V	V	H	VH	VH	VH
Выработка на добыч-ном горизонте	2000	VL	L	M	M	H	VH	VH	VH
Зона добычных работ	3000	VL	L	V	V	H	VH	VH	VH
Подготовительная вы-работка уступа	4000	VL	L	M	M	H	VH	VH	VH
Подготовка нового ус-тупа	7000	L	M	M	H	VH	VH	E	E
Продуктивное бурение и зарядание	1000	M	H	H	H	VH	E	E	E
Рабочие места	14000	M	H	VH	VH	E	E	E	E

М – moderate – средний;
 Н – high высокий;
 VH – very high – очень высокий;
 Е – extreme чрезвычайный.

В табл. 4.20 значения RDP и вероятности наиболее тяжелых повреждений R_4 и R_5 принимаются соответственно по данным расчетов RDP и номограмм (рис. 4.16, 4.17).

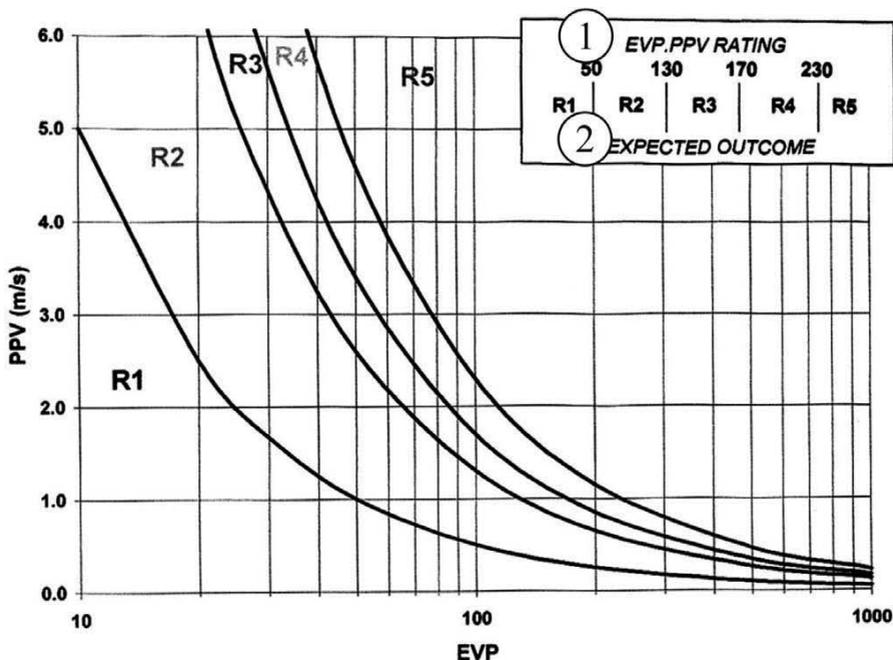


Рис. 4.16. Уровень ожидаемых повреждений

1 – оценка произведений $EVP \times PPV$; 2 – ожидаемый результат.

4.5.3 Оценка подверженности риску обрушения пород

Определенные виды экскавации или рабочих операций представляют собой более высокую подверженность персонала риску обрушения пород (в том числе сейсмическому) чем другие. Оценка этой подверженности основывается на

времени, проведенном в опасной зоне, и степени защищенности рабочих.

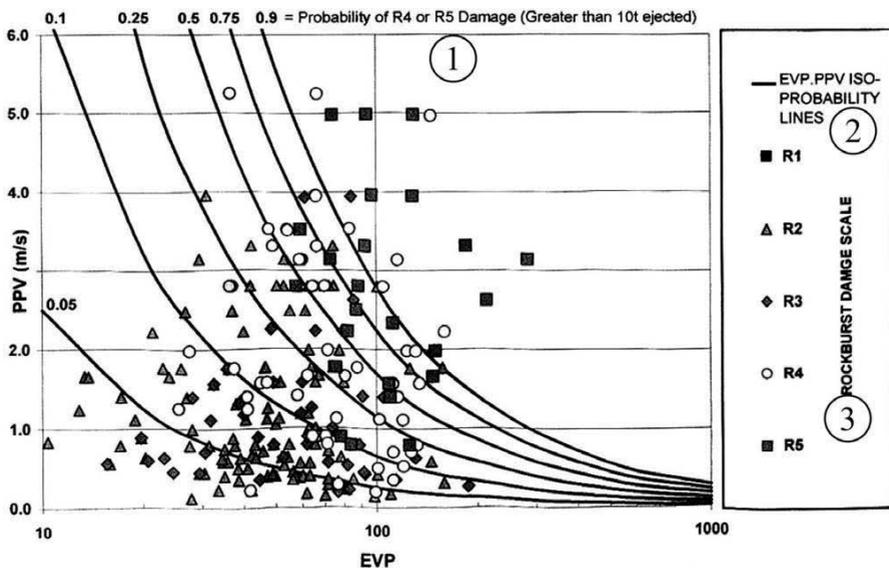


Рис. 4.17. Контуры вероятности серьезных повреждений R_4 и R_5
 1 – вероятность повреждений R_4 и R_5 ; 2 – изолинии вероятности;
 3 – шкала повреждений.

Примерный порядок увеличения подверженности риску может быть следующим:

- запрещенный доступ к горным работам;
- выработки вне активных горных работ;
- выработки на продуктивном горизонте;
- зона добычных работ и погрузка руды;
- горизонт подготовительных работ;
- рабочие места.

При обсуждении вопросов подверженности риску обрушений пород (включая внезапные выбросы) в подземных полостях следует иметь ввиду:

- большинство зарегистрированных обрушений произошло в штреках (выработках, параллельных простиранию

рудного тела) в пределах 10 м от активного забоя. На этом же расстоянии были отмечены 83% случаев травматизма персонала и 71% повреждений оборудования;

- почти четверть всех зарегистрированных обрушений пород приводили к травматизму персонала;

- несмотря на значительное число крупных обрушений, более 90% случаев травматизма персонала были вызваны обрушениями пород массой менее 1 т. Зарегистрированные на шахтах Австралии с 1999 г., эти случаи представляли собой выпадение фрагментов пород из пространства между болтами на участках, где не была установлена крепь, поддерживающая поверхность полости (например, металлическая сетка);

- с 1998 г. были приняты серьезные меры по совершенствованию контроля обрушений пород, включая, в частности, немедленную вслед за подвиганием забоя установку постоянной крепи, а также увеличение площади поддержания поверхности полости, строгое следование нормам и правилам, планирование горных работ, использование аналитических инструментов оценки риска;

- риск травматизма малыми обрушениями пород остается высоким возле действующего забоя, но не ограничивается этой зоной;

- за последнее десятилетие на шахтах Австралии происходили за год в среднем 75 обрушений пород, причиняя 8 случаев травматизма;

- данные за период между 1993 г. и 2001 г. показывают, что среднегодовое число смертельных случаев при обрушениях пород колебалось от 0 до 3, причем четверть этих случаев связана с внезапными выбросами. За последние годы заметного улучшения этих показателей не произошло;

- зарегистрированная масса обрушенных пород, вызвавших смертельные случаи, составляла обычно более 2 т (часто более 20 т).

Из изложенной статистики могут быть сделаны следующие выводы:

- участок выработки, близкий к действующему забою, является особо опасным, поскольку представляет собой, как незакрепленную зону (забой или периметр сечения в пределах нескольких метров от забоя), так и закрепленную – на некотором от него расстоянии. Этим определяется подверженность риску персонала, находящегося в выработке;

- оценка фактора подверженности персонала риску обрушений пород в действующем забое определяется временем пребывания персонала на конкретном рабочем месте, а также опасностью выполняемых при этом производственных операций;

- большая доля травматизма, вызванного падением фрагментов пород малой и средней массы (менее 1 т) показывает уязвимость к ним персонала не меньшую, чем к большим обрушениям. Эти малые падения могут не иметь значения для людей, находящихся внутри кабин мобильного оборудования, например, погрузочно-транспортных средств (локомотивов, самоходных вагонов, перегружателей, погрузочных машин), но будут опасными для работающих снаружи этих средств.

При расчетах подверженности персонала риску принимаются во внимание следующие факторы:

- относительный уровень защиты персонала и оборудования от обрушения пород;

- близость рабочего и оборудования к источнику геотехнической опасности;

- показатель продолжительности пребывания персонала в опасной зоне, дифференцированный по отдельным производственным операциям.

Ключевым фактором в оценке подверженности персонала риску обрушений пород служит уровень его защиты. Очевидно, что рабочий, находящийся вне кабины оборудования и защищенный только каской, более уязвим по сравнению с тем, кто находится в кабине специальной закрытой или усиленной рамной конструкции.

В табл. 4.22 показана оценка уязвимости персонала E_1 .

Таблица 4.22 – Оценка уязвимости персонала

Вид защиты персонала	E_1
Закрытая кабина	0,8
Кабина рамной конструкции	1,0
Жесткий зонт над кабиной	2,0
Неукрепленная кабина	20
Индивидуальная защита персонала	50

Данные, приведенные в табл. 4.22, основаны на соотношении энергии, которая может быть абсорбирована кабиной, имеющей разную степень защищенности, и твердой каской рабочего при падении породы. Другим фактором, влияющим на результаты расчетов, служила разница величины воздействия вертикального и бокового ударов падающих пород. Учитывалось также, что человек, находящийся в кабине, вообще не подвержен падению (выбросу) пород с нижней части стены (высоты 1,5-2 м).

Другой проблемой, которая принималась во внимание при расчетах показателей подверженности риску обрушения (выброса) пород была близость рабочего места к источнику опасности, такому, как подвигающийся забой, кромка добычного уступа, незакрепленная кровля или неподдерживаемая поверхность полости, зона сейсмической активности. Статистика обнаруживает и другие опасные зоны, например, пересечения выработок, на которых приходится около 16% зарегистрированных обрушений пород (в базе данных за 1993-2001 гг.), хотя площадь собственно пересечений существенно меньше общей площади пересекающихся выработок. Это объясняется большими пролетами и неадекватной крепью пересечений.

Табл. 4.23 показывает оценку E_2 расстояния рабочего места от источника опасности. Статистические данные показывают, что 70% зарегистрированных случаев травматизма произошли в пределах 10 м от забоя и менее 10% - на расстоянии более 50 м. Фактические данные, а также их экстра-

поляция были использованы для определения оценки различных интервалов близости к источнику опасности.

Таблица 4.23 – Оценка фактора близости к источнику опасности

Близость к источнику геотехнической опасности	E_2
< 5	10
5-15	5
15-30	2
> 30	1

Для определения продолжительности подверженности людей и оборудования опасности обрушений (выбросов) пород проводились исследования, включавшие различные подразделения шахтного персонала, связанные с добычными и подготовительными работами. В состав уязвимого персонала входили также работники технического руководства и инспекционного надзора, в частности, геологи, инженеры, дизайнеры. Рассматривалось время, проведенное в главных рабочих зонах, продолжительность перемещения людей по выработкам доступа к забоям, их посещения неработающих горизонтов.

Для анализа продолжительности пребывания мобильного оборудования в опасных зонах рассматривалось общее время, проведенной машиной на рабочем месте, включающее, как продуктивную работу, так и периоды ожидания, ремонта, парковки.

В оценку подверженности риску обрушений (выбросов) пород включен компонент неопределенности геотехнических условий. Он рассчитывается, как относительная пропорция времени, затраченного рабочим для выполнения операций с наибольшим риском, которая обозначается «%НТ» (Hazardous time proportion – пропорция опасного времени), т.е. процент времени пребывания в зоне наибольшего риска.

К видам производственной деятельности, в которых необходима подобная оценка неопределенности, относятся:

- вход в забой после взрывных работ и доступ в старые неподдерживаемые выработки, где ранее работавший персонал постоянно испытывал наибольший риск, но в которых затем неопределенность условий была уменьшена регулярными инспекциями;

- инспекция нестабильных участков выработок, зависаний, расслоений, трещиноватости пород и т.д.;

- установка и ремонт крепи;

- ручная оборка призабойных зон;

- работа в зонах с неподдерживаемой поверхностью полости и вблизи целиков.

Анализ подверженности риску проводится с использованием показателя «часовой оценки подверженности» (Hourly Exposure Rating) – Е/час для различных видов производственной деятельности.

Расчеты выполняются в следующем порядке:

- определяется уязвимость персонала или оборудования (фактор E_1);

- определяется близость деятельности к источнику геотехнической опасности (E_2);

- в общем случае эти два фактора перемножаются, чтобы получить $E/\text{час} = E_1 E_2$;

- для зон или задач с высокой степенью неопределенности условий добавляется компонент «задача высокого риска», использующий показатель неопределенности %НТ и максимальное значение фактора близости $E_2 = 10$;

- тогда общее значение Е/час составит:

$$E/\text{час} = E_1 \times E_2 + (\%НТ \times E_1 \times 10).$$

Далее приводятся примеры расчетов и сравнение часовой подверженности персонала для некоторых подземных операций.

Пример 1. Низкая часовая подверженность персонала. Работа погрузочной машины в забое штрека.

Закрытая кабина, $E_1 = 0,8$;

Машина работает в пределах 5 м от забоя, $E_2 = 10$;

Хорошие условия поддержания выработки;

Оператор остается в машине, нет задач, связанных с высоким риском. %НТ = 0.

Тогда

$$E/\text{час} = E_1 \cdot E_2 + \%НТ \cdot E_1 \cdot 10 = 0,8 \cdot 10 + 0,8 \cdot 10 = 8.$$

Пример 2. Средняя часовая подверженность персонала.

Бурение скважин в забое бурильным станком.

Оператор под зонтом в кабине, $E_1 = 2$;

Находясь в кабине, оператор работает в пределах 5-10 м от забоя, $E_2 = 5$;

Примерно 20% времени оператор бурильного станка проводит вне кабины вблизи неподдерживаемой части забоя, например, меняя буровой инструмент.

Поэтому для этой операции %НТ = 20%, $E_1 = 50$.

Тогда

$$E/\text{час} = E_1 \cdot E_2 + \%НТ \cdot E_1 \cdot 10 = 2 \cdot 5 + 0,2 \cdot 50 \cdot 10 = 110.$$

Пример 3. Высокая часовая подверженность персонала.

Заряжание скважин в забое взрывчатым веществом.

Персонал защищен только индивидуальными средствами, $E_1 = 50$.

Работа в пределах 5 м от забоя, $E_2 = 10$, в неподдерживаемой зоне между забоем и последним рядом крепи кровли, %НТ = 100%.

Тогда

$$E/\text{час} = E_1 \cdot E_2 + \%НТ \cdot E_1 \cdot 10 = 50 \cdot 10 + 1,0 \cdot 50 \cdot 10 = 1000.$$

Общая оценка подверженности риску каждой операции за смену определяется следующим образом:

$$E_{\text{опер/смену}} = \text{Часовая подверженность рабочего (E/час)} \times \text{Численность персонала (N)} \times$$

$$\text{Продолжительность операции за смену } (\Delta t) = E/\text{час} \times N \Delta t.$$

Для условий приведенных выше примеров определяется подверженность риску операции за смену.

Для примера 1: $E/\text{час} = 8$.

Из кумулятивной (накопительной) кривой производительности погрузки породы (рис. 4.18) определяем среднее время работы машины за смену – 4,2 час/смену, при медиане кумулятивной вероятности 50% (или T50) работа машины равна 3,2 час/смену. Методикой предусматривается учет наиболее критической точки занятости машины при 80% кумулятивной вероятности (T80), когда $\Delta t = 6,7$ час/смену.

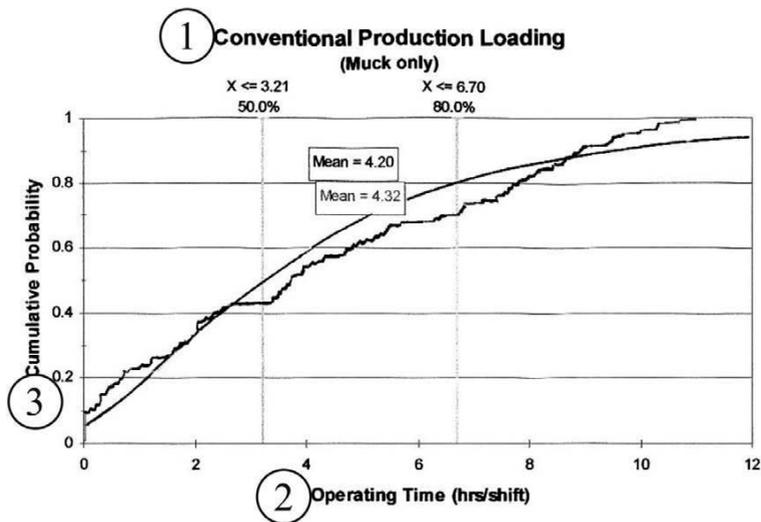


Рис. 4.18. Кумулятивная (накопительная) кривая производительности погрузки породы

1 – традиционная производительность погрузки; 2 – продолжительность оперативной работы; 3 – кумулятивная вероятность.

Тогда при одном работающем машинисте

$$N\Delta t = 1 \times 6,7 = 6,7 \text{ чел. час./смену},$$

а подверженность операции риску составит

$$E_{\text{опер/смену}} = E/\text{час} \times N\Delta t = 8 \times 6,7 = 54.$$

Для примера 3: $E/\text{час} = 1000$.

Из кумулятивной кривой производительности зарядания скважин (рис. 4.19) среднее время работ составит 1,65 час/смену, T50 = 1,5 часа/смену, T80 = 2,36 час/смену. При

предположении, что на операции занято 2 человека и используя значение T80 получим:

$$N\Delta t = 2 \times 2,36 = 4,7 \text{ чел. час./смену,}$$

① Development Charge-Up

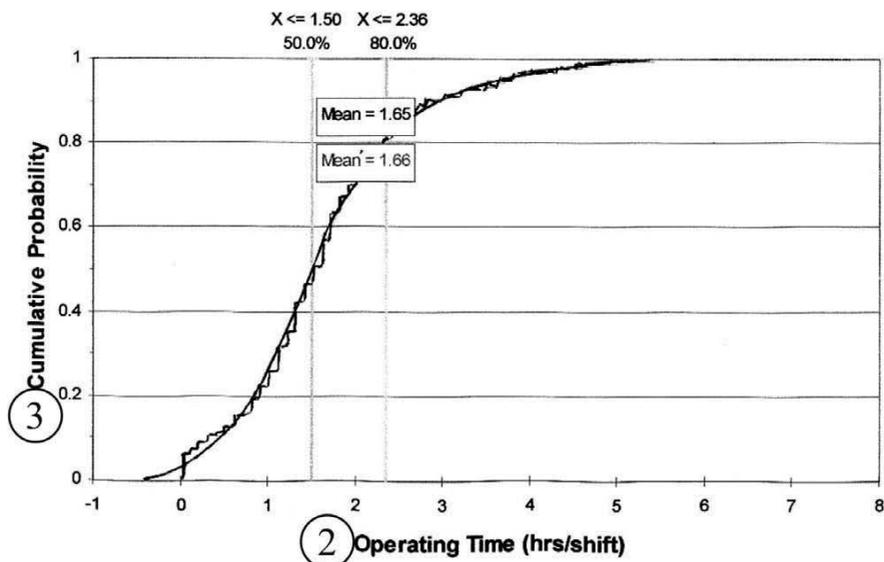


Рис. 4.19. Кумулятивная кривая заряжения скважин

1 – кривая выполнения работ; 2 – продолжительность оперативной работы; 3 – кумулятивная вероятность.

Тогда

$$E_{\text{опер/смену}} = E/\text{час} \cdot N\Delta t = 1000 \cdot 4,7 = 4700.$$

Суммируя подверженность риску каждой операции за смену, получим максимальное значение

$$E_{\text{max}} = \sum E_{\text{опер/смену}} = \sum_{\text{смену}} (E/\text{час} \cdot N\Delta t).$$

В табл. 4.24 приведены категории выработок и производственных операций, для которых определяются уровни подверженности персонала риску обрушений (выбросов) пород.

Продолжительность подверженности риску персонала и мобильного оборудования в существующих подземных полостях – стволах, мастерских, дробилках и др., рассчитывается

Таблица 4.24 - Подверженность персонала риску обрушений

№№ категорий	Категории выработок и производственных операций	Данные для расчета $E_{\max/смену}$
1	Наклонные выработки, вскрывающие горизонты	Транспортировка грузов и людей
2	Стволы	Общий персонал в начале смены
3	Зона инфраструктуры – склады, мастерские, дробилки, погрузочные пункты	Локальный персонал
4	Неработающие горизонты – выработки доступа	Мобильные бригады
5	Подготовительные работы возле действующего забоя	Персонал подготовительных работ
6	Подготовительные работы - выработки доступа	Транспортировка персонала подготовительных работ
7	Продуктивный горизонт – бурение в зоне действующего забоя	Персонал буровых работ
8	Продуктивный горизонт – бурение в выработках доступа	Транспортировка персонала буровых работ
9	Продуктивный горизонт – погрузка руды в зоне действующего забоя	Персонал погрузочных работ
10	Продуктивный горизонт – погрузка руды в выработках доступа	Транспортировка персонала погрузочных работ
11	Зона запрещенного доступа	Пренебрежимая подверженность
12	Зона ограниченного доступа	Только ограниченная инспекция

ся как средняя для всей численности работающих. Максимальная подверженность риску в околоствольном дворе наблюдается в начале смены при посадке персонала в клеть.

Другие рабочие места такие, как склады, хранилища горюче-смазочных материалов, имеют низкую подверженность, поскольку посещаются людьми только по мере необходимости и на недолгое время. К персоналу, подвергающемуся риску на неработающих горизонтах, относятся инспекторы состояния выработок, рабочие обслуживания вентиляции шахты, ремонта крепи и восстановления выработок.

Затраты времени в местах иных, чем активные рабочие зоны, сведены в табл. 4.25.

Таблица 4.25 – Затраты времени персонала в нерабочих зонах

Статистические показатели, час/смену	Инфраструктура			Транспорт	
	склад	камера	клеть	главные выработки	штреки
Максимальные	1,8	0,75	4,15	2,39	5,15
Минимальные	0,43	0,00	0,38	0,00	0,00
Средние	1.20	0,16	1.33	0,76	0,74

Для таких специфических работ, как поддержание стволов, ремонт рудоспусков и т.д. при отсутствии конкретных показателей могут быть приняты значения:

- фактора неопределенности геотехнических условий, %НТ = 0;

- фактора уязвимости $E_1 = 50$ (для пешеходов) и $E_1 = 20$ (для общего транспорта);

- фактора близости к источнику опасности $E_2 = 1$.

Для других шахтных объектов и задач – инфраструктуры, конвейерных линий, дробильных и перегрузочных станций вероятностная подверженность риску не определяется из-за постоянства этого показателя.

Объемы транспортировки людей по подземным выработкам зависят от числа персонала, транспортной схемы шахты и мобильности работающих. Эти данные собираются из по-

сменных записей и наблюдений. В качестве руководства здесь могут быть использованы данные табл. 4.25.

Производительность и количество транспортных средств рассчитывается в зависимости от скорости и расстояния транспортировки. Эти данные становятся основой для расчетов максимальной подверженности риску по описанной выше методике, в которых принимается обычно средний уровень защиты E_1 , оценка близости к опасности $E_2 = 1$, фактор неопределенности $\%HT = 0$ (для транспорта). Суммированием полученных результатов определяется максимальная степень подверженности риску за смену для различных путей транспортировки.

При расположении части маршрута движения в зонах рабочих операций, например, оборки отслоившейся поверхности выработок, параметры модели расчета увеличиваются (например, принимаются значения $\%HT > 0$ и $E_2 > 1$).

Для специфических мест маршрута таких, как пересечения выработок, оценивается вероятность обрушения пород во время движения пешеходов или транспортных средств, что требует оценки числа обрушений в сутки.

В табл. 4.26 сведены оценки относительных уровней подверженности риску.

Напомним, что сейсмический риск определяется из уравнения:

Сейсмический риск = Вероятность сейсмической опасности \times
Потенциал повреждений \times Подверженность риску.

Оценка вероятности сейсмической опасности, кроме подхода описанного в предыдущих разделах, может проводиться в соответствии с табл. 4.27, где приведено качественное описание категорий вероятности и их количественное ранжирование.

Наибольшим и наиболее повреждающим значением магнитуды сейсмических событий в условиях австралийских

шахт принято $M_L = 2,5(\pm 0,5)$, минимальное значение $M_L = 0 - 0,5$.

Вероятность сейсмической опасности сведена в табл. 4.28, потенциала повреждений – в табл. 4.29.

Таблица 4.26 - Оценки относительных уровней подверженности риску

Е/час	E_{\max}	Уровни подверженности риску	Эквивалентная оценка продолжительности подверженности для $E_1 = 50, E_2 = 10$	Рабочие места
< 20	< 500	очень низкая	< 0,5 чел. час/смену	Зоны с ограниченным доступом, доступ к продуктивному горизонту погрузки руды
20-49	500-2499	низкая	0,5-2,5 чел. час/смену	Выработки вне действующих забоев, выработки подготавливаемого горизонта
50-249	2500-4999	средняя	2,5-5 чел. час/смену	Горизонт продуктивного взрывания и погрузки руды
250-499	5000-7499	высокая	5-15 чел. час/смену	Развитие подготовительных работ, ремонтно-восстановительные работы
≥ 500	≥ 7500	очень высокая	≥ 15 чел. час/смену	Работающие забои, подготовительные выработки без связи с поверхностью

Совместные полу-количественные оценки вероятности сейсмической опасности и потенциала повреждений приведены в табл. 4.30.

Таблица 4.27 – Ранжирование вероятностей в соответствии с качественным описанием

Качественное описание категорий вероятности	Примерное количественное ранжирование
Почти определенная	$\geq 0,95$
Очень вероятная	0,8-0,949
Вероятная	0,65-0,799
Средняя	0,35-0,649
Невероятная	0,1-0,349
Редкая	0,01-0,099
Пренебрежимая	$< 0,01$

Таблица 4.28 – Вероятность сейсмической опасности

Качественное описание сейсмической опасности	Вероятность опасности сейсмического события при величине магнитуды		
	$M_L = 0,5$	$M_L = 1,5$	$M_L = 2,5$
Очень низкая	невероятная	редкая	пренебрежимая
Низкая	средняя	невероятная	редкая
Средняя	вероятная	средняя	невероятная
Высокая	очень вероятная	вероятная	средняя
Очень высокая	почти определенная	очень вероятная	вероятная

Таблица 4.29 – Вероятность потенциала повреждений

Качественное описание потенциала повреждений	Вероятность сейсмической опасности		
	сотрясения	обрушения	выброса
Очень низкий	невероятная	редкая	пренебрежимая
Низкий	средняя	невероятная	редкая
Средний	вероятная	средняя	невероятная
Высокий	очень вероятная	вероятная	средняя
Очень высокий	почти определенная	очень вероятная	вероятная

Интегрируя данные табл. 4.29 и 4.30, получим табл. 4.31, которая связывает оценку потенциала повреждений и его вероятности.

Для того, чтобы определить относительную степень сейсмического риска персонала, максимальную оценку подверженности риску за смену (E_{\max}) (табл. 4.26) следует привести к удобному масштабу умножением на $1/500$, что позволяет приспособить эту оценку к значениям ранжирования потенциальных повреждений. Затем для получения оценки риска оценка потенциальных повреждений D (из табл. 4.30) умножается на оценку $E_{\max}/500$.

Таблица 4.30 – Совместные оценки вероятности сейсмической опасности и потенциала повреждений

Качественное описание вероятности опасности	Диапазон количественных оценок потенциала повреждений	Принятая количественная оценка потенциала повреждений
Очень низкая	0-1	1
Низкая	2-7	7
Средняя	8-13	13
Высокая	14-19	19
Очень высокая	≥ 20	25

Результаты расчетов сопоставляются с данными матрицы рис. 4.20 а, считающей подверженность риску наиболее важным компонентом и использующей ее высшую оценку или матрицы рис. 4.20 б, основанной на средней оценке подверженности риску.

Примером расчета может служить оценка степени риска (RR):

1) $D = 19$ (из табл. 4.30), соединяемая с $E_{\max} = 5000 - 7000$ (из табл. 4.26)

$$RR = 19 \times (10 - 15) = 190 - 285 \text{ (очень высокая) (рис. 4.20 а)}$$

2) $D = 13$ с $E_{\max} = 3000 - 5000$

$$RR = 13 \times (6 - 10) = 78 - 130 \text{ (высокая) (рис. 4.20 а)}$$

3) $D = 7$ с $E_{\max} = 1000 - 2500$

$$RR = 7 \times (2 - 5) = 14 - 35 \text{ (средняя) (рис. 4.20 б)}$$

Таблица 4.31 – Интегрированная оценка потенциала повреждений

Оценка потенциала повреждений	Качественное описание потенциала повреждений	Вероятность сейсмической опасности		
		сотрясения	обрушения	выброса
1	Очень низкий	невероятная	редкая	пренебрежимая
7	Низкий	средняя	невероятная	редкая
13	Средний	вероятная	средняя	невероятная
19	Высокий	очень вероятная	вероятная	средняя
25	Очень высокий	почти определенная	очень вероятная	вероятная

Сводка критериев относительного риска показана в табл. 4.32.

Расчеты подверженности риску обрушений в различных выработках проводилась для шахт Big Bell, Австралия и Brungwick, Канада.

Результаты расчетов картографировались в соответствии с различными уровнями рисков, что показано, например, на рис. 4.21 для шахты Big Bell в соответствии с данными, приведенными в табл. 4.26.

a)

RR = D x E _{max} /500	Exposure per shift	2	3	4	5	6	7
	E _{max} /500	Very Low	Low	Moderate	High	Very High	
		1	5	10	15	20-30	
Damage Potential Rating (D)							
Very Low	1	1	5	10	15	≥20	
Low	7	7	35	70	105	≥140	
Moderate	13	13	65	130	195	≥260	
High	19	19	95	190	285	≥380	
Very High	25	25	125	250	375	≥500	

b)

RR = D x E _{max} /500	Exposure per shift	Very Low	Low	Moderate	High	Very High
	E _{max} /500	0.5	3	7.5	12.5	22
Damage Potential Rating (D)						
Very Low	1	0.5	3	7.5	12.5	22
Low	7	3.5	21	52	87	154
Moderate	13	6.5	39	97	162	286
High	19	9.5	57	142	238	418
Very High	25	12.5	75	187	312	550

Рис. 4.20. Матрицы оценок подверженности риску обрушений пород

а) высокая степень оценки.

б) средняя степень оценки.

1 – оценка потенциала повреждений; 2 – подверженность риску; 3 – очень низкая; 4 – низкая; 5 – средняя; 6 – высокая; 7 – очень высокая.

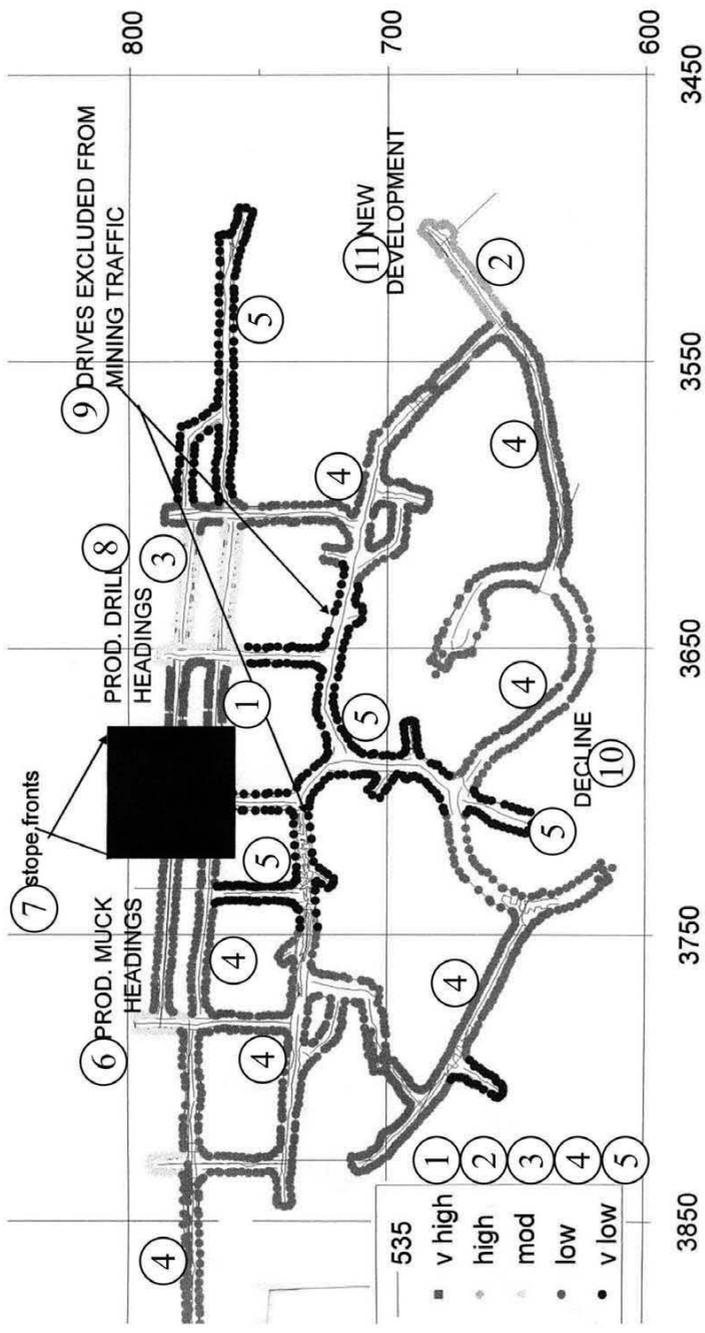


Рис. 4.21. Пример картографирования степени сейсмических рисков на гор. 535 м шахты Big Bell
 1 – очень высокая степень; 2 – высокая; 3 – средняя; 4 – низкая; 5 – очень низкая; 6 – погрузка породы в выработке; 7 – уступ; 8 – бурение в выработке; 9 – выработка без транспортной нагрузки; 10 – рампа; 11 – подготовка нового участка.

Таблица 4.32 – Сводка критериев относительного риска

Качественное описание риска	Оценка риска $RR = (DE_{\max})/500$
Очень низкий	$R < 0,5$
Низкий	$0,5 \leq R < 2$
Средний	$12 \leq R < 70$
Высокий	$70 \leq R < 190$
Очень высокий	$190 \leq R < 300$
Экстремальный	$R \geq 300$

Типичные параметры подверженности риску на гор. 535м шахты Big Bell показаны в табл. 4.33.

Некоторые другие подходы к оценке сейсмического риска, основанные на мнениях экспертов, показаны в табл. 4.34-4.36.

Таблица 4.33 – Типичные параметры подверженности риску

Операции	E1	E2	%НТ	E/hr
1	2	3	4	5
Перегрузочные операции при подготовительных работах	1	10	0-5%	10-35
Бурение в подготовительном забое	2	5	20%	110
Заряжание в подготовительном забое	50	10	100%	1000
Заряжание в уступе	50	5	0-25%	250-370
Алмазное бурение (разведочное)	50	1	0%	50
Бурение для первичной крепи	2	5	50%	260
Бурение для вторичной крепи	2	5	5%	35
Анализ разведочных кернов	50	5	20%	350
Картографирование	50	5	0-20%	250-350
Установка первичной усиленной крепи (открытая кабина)	50	10	50%	750
Установка первичной усиленной крепи (закрытая кабина)	2	10	20%	120
Бурение для вторичной крепи	2	5	5%	35

Продолжение таблицы 4.33

1	2	3	4	5
Установка вторичной усиленной крепи (открытая кабина)	50	10	5%	525
Установка вторичной усиленной крепи (закрытая кабина)	2	5	20%	110
Ручная оборка	50	10	100%	1000
Механическая оборка (закрытая кабина)	2	10	20%	120
Продуктивное бурение	2	5	5%	35
Погрузка руды (традиционная)	1	5	0-5%	5-30
Погрузка руды (дистанционное управление)	50	2	0%	100
Обслуживание при установке	50	5	5%	275
Ремонт в забое	50	2-5	5%	125-200
Ремонт в мастерских	50	1	0%	50
Подготовка и зачистка скважин в уступе	50	5	20%	350
Обслуживание при работе	50	1	0%	50
Набрызгбетонирование	50	5	10%	300
Надзор	50	2	5%	125
Транспортировка	20	1	0%	20
Откачка воды	50	5	10%	300

Таблица 4.34 – Матрица сейсмического риска, основанная на оценке подверженности персонала

Вероятность внезапных выбросов		Вероятность серьезных последствий для персонала				
Качественная	Количественная	Очень низкая	Низкая	Средняя	Высокая	Очень высокая (смертельные случаи)
		1	3	6	8	10
1	2	3	4	5	6	7
Очень низкая	1	1	3	6	8	10
Низкая	2	2	6	12	16	20

Продолжение таблицы 4.34

1	2	3	4	5	6	7
Средняя	3	3	9	18	24	30
Высокая	4	4	12	24	32	40
Очень высокая	5	5	15	30	40	50

Таблица 4.35 – Вероятностная оценка сейсмического риска

Подверженность риску	Вероятность обрушения				
	высокая		→ низкая		
Постоянная ↓	Почти определенная	Вероятная	Средняя	Невероятная	Редкая
	Вероятная	Средняя	Невероятная	Редкая	Редкая
	Средняя	Невероятная	Редкая	Редкая	Редкая
	Невероятная	Редкая	Редкая	Редкая	Редкая
Подверженности нет	Редкая	Редкая	Редкая	Редкая	Редкая

Таблица 4.36 – Матрица качественной оценки сейсмического риска

Вероятность	Последствия				
	Катастрофический (смертельный)	Высокий (тяжелые травмы)	Средний (требуется лечение)	Низкий (скорая помощь)	Незначительный
Почти определенная	Е	Е	Н	М	Л
Вероятная	Е	Н	М	М	Л
Средняя	Н	М	М	Л	Л
Невероятная	М	Л	Л	Л	Л
Редкая	Л	Л	Л	Л	Л

E (extreme) – чрезвычайный риск
H (high) – высокий риск
M (moderate) – средний риск
L (low) – низкий риск.

4.6 Оценка сейсмического риска на шахтах Южной Африки

Отличным от описанного является подход к оценке сейсмической опасности, применяемый на шахте Elandsrand, Южная Африка (рис. 4.22), где ежемесячно определяются сейсмические риски для работающих добычных уступов. Этот описанный далее подход основан на 6 параметрах сейсмической опасности и применении соответствующей компьютерной технологии.

Шахта Elandsrand расположена в регионе Far West Rand и разрабатывает месторождение Ventersdorp Contact Reef, залегающее в кварцитах. Работы ведутся на глубине от 2100 м до 2700 м. Поддержание рабочего пространства осуществляется с помощью целиков шириной 30 м, расположенных с интервалом 200 м. В среднем на шахте отрабатывается площадь 40000 м² в месяц с добычей 200000 т руды. Годовой выход золота в 1995 г. составил 16,3 т. В этом же году был зарегистрирован 41 смертельный случай при внезапных выбросах пород.

В шахтном поле отмечены нарушения с амплитудой сброса до 60 м и изверженные вторжения, влияющие на сейсмическую активность.

Система сейсмического мониторинга состоит из 23 станций. Гипоцентры событий отмечаются с точностью ± 25 м и определяются в добычных и подготовительных забоях. Минимальная магнитуда, регистрируемая сетью мониторинга, равна 0,0 по Рихтеру.

В 1994 г. на шахте была разработана и применена количественная оценка риска сейсмической опасности (SHA –

Seismic Hazard Assessment). Оценивались параметры, относящиеся к геологии, горной геометрии и напряжениям в забое. Определялись два сейсмических параметра – средний индекс сейсмичности (ASI – Average Seismic Index) и кумулятивный наблюдаемый объем массива, подвергаемый сейсмическим пластическим деформациям (CAV – Cumulative Apparent Volume).

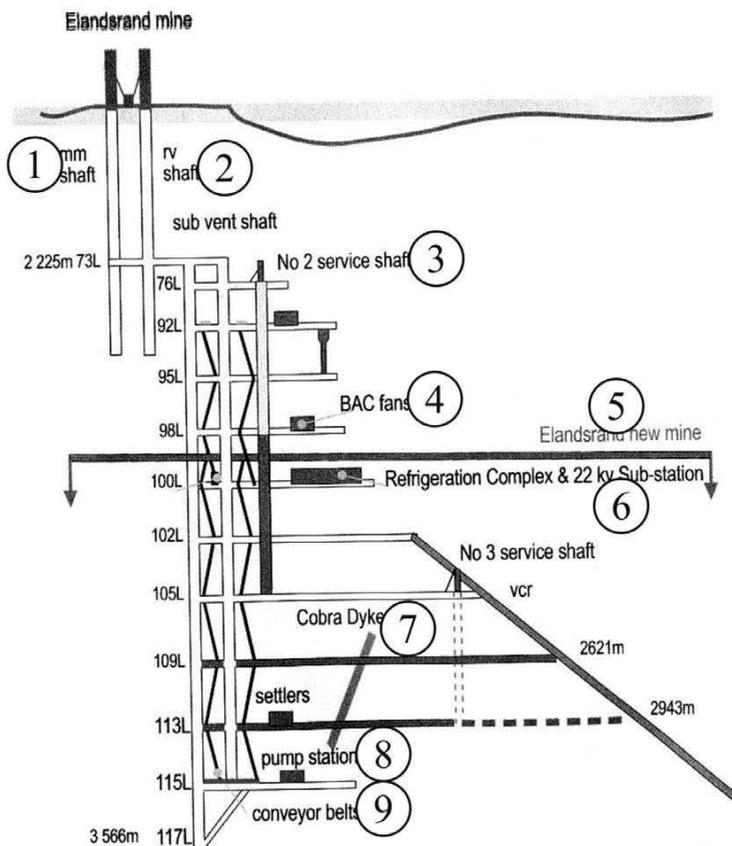


Рис. 4.22. Схема вскрытия шахты Elandsrand

1 – ствол для людей и материалов; 2 – ствол для грузов и вентиляции; 3 – вспомогательный ствол; 4 – вентилятор; 5 – новый участок шахты; 6 – комплекс кондиционирования; 7 – изверженное вторжение Cobra; 8 – насосная станция; 9 – ленточный конвейер.

Оценки параметров (кроме геологии) ранжировались от 1 до 5, оценка геологии находилась в интервале от 1 до 8 (табл. 4.37).

Таблица 4.37 – Оценка параметров сейсмической опасности

Параметр	Описание	Основан на...	Значения параметра	Оценка параметра
1	2	3	4	5
Средний сейсмический индекс ASI	Отражает напряжение в породных массах	...данных 4 предыдущих недель	1-2 2-4 4-6 6-8 > 8	1 2 3 4 5
Кумулятивный наблюдаемый объем CAV	Косейсмическая пластическая деформация, м ³	тот же	1-3 3-6 6-9 9-12 > 12	1 2 3 4 5
Темп высвобождения энергии (ERR – Energy Release Raiting)	Энергия, высвобождаемая при сейсмическом событии MJ/м ²	...планируемых горных работах следующего месяца	1-4 4-8 8-12 12-16 > 16	1 2 3 4 5
Оценка конфигурации забоя (FCR – Face Configuration Raiting)	Факторы риска: опережение уступов, опорное давление, целик, общая конфигурация	то же	0,5-2	1-5

Продолжение таблицы 4.37

1	2	3	4	5
Геология	Факторы риска: параметры рудного тела, геологические особенности и неоднородности	то же	1,5-3,5	1-8
Производство	Общая площадь, отработанная комплексом панелей, м ²	...площади, планируемой на следующий месяц	0-400 м ²	5
			400-800 м ²	3
			800-1200 м ²	1
			1200-1600 м ²	3
			> 1600 м ²	5

Параметры производства при оценке риска зависят от месячной отработываемой площади залежи и при 800-1200 м² оцениваются самым низким значением 1, тогда как очень низкие и очень высокие темпы добычи, определяемые этой площадью, оцениваются высокой степенью риска со значением 5. Это объясняется тем, что в комплексе уступов с постоянной длиной забоя снижение уровня добычи (и соответственно отработанной за месяц площади) выражается уменьшением подвигания забоя. Это приводит к ухудшению условий поддержания висячего бока (кровли) пород, вмещающих рудное тело, и их обрушению. С другой стороны, повышенные темпы отработки забоя увеличивают уровень сейсмичности. Поэтому для обоих этих обстоятельств, принята высокая степень оценки риска 5.

Оценка степени риска проводится на шахте Elandsrand в конце каждого месяца и действительна на следующий 4-х недельный период.

При рассмотрении табл. 4.37 нужно иметь ввиду, что:

- сейсмический индекс – число сейсмических событий на единицу обработанной площади;

- кумулятивный наблюдаемый объем – объем массива, подвергаемый косейсмическим пластическим деформациям, которые являются результатом событий, сопровождающих основное сейсмическое событие;

- параметр конфигурации забоя: исходная оценка – 1,0. При опережении уступов < 5 м или > 10 м – оценка равна 0,5, при целике > 20 м – 1,0, при расстоянии до соседних работ < 30 м, высокой сейсмичности истории, наличии неоднородностей в окрестностях – оценка – 2,0;

- параметр геологии: исходная оценка для пологого месторождения равна 1,5, горные работы, удаленные от сейсмически активных неоднородностей – оценка – 1,5, вблизи сейсмически активных зон в пределах 20-40 м – 3,5, при наклонном залегании или раздвоении залежи – 2,5, при множественных сочленениях пород висячем боку – 2,0.

В табл. 4.38 приведена интегральная оценка сейсмической опасности, зависящая от суммы значений оценок параметров.

Таблица 4.38 – Интегральная оценка сейсмической опасности

Сумма значений параметров	Интегральная оценка SHA
1-10	1 – низкая
11-14	2 – ниже средней
14-20	3 – средняя
20-26	4 – выше средней
> 26	5 – высокая

Практическое применение системы SHA показано на примере обработки участка 88/28 East, которая началась в ноябре 1994 г. и завершилась в середине 1996 г. Участок расположен ниже главного изверженного вторжения Fred Duke, отделенного от горных работ целиком 10 м с нижней стороны и

5 м с верхней стороны вторжения. Часть залежи с его верхней стороны была отработана ранее (рис. 4.23). В двух из 8 уступов участка ожидалась встреча более мелких вторжений, ориентированных параллельно главному.

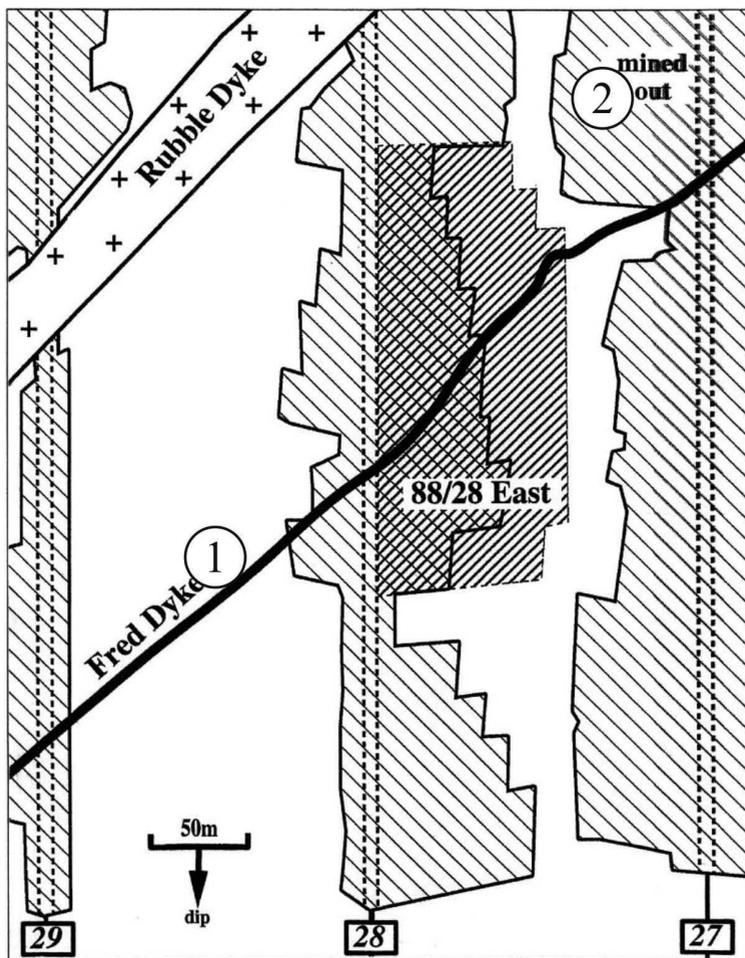


Рис. 4.23. План горных работ участка 88/28 East

1 – изверженное вторжение; 2 – выработанное пространство.

Первоначально при одновременной работе только двух забоев параметры геометрии, геологии и напряжений оцени-

вались низкими значениями, а общая оценка SHA была «ниже средней». Лишь параметр «производство» имел высокую опасность из-за малой скорости подвигания забоя, поскольку уступы были подготовлены к работе недавно. В марте 1995г. в уступе E4 проявилась сейсмическая активность вторжения Fred Dyke, что привело к росту напряжений в забое (рис. 4.24). Оценка параметра геологии выросла с 1 до 8 и интегральная оценка сейсмической опасности участка 88/28 East при сумме значений параметров 24 составила 4. В следующие месяцы этот уступ испытал три сейсмических события с магнитудой более 1,0, два из которых произошли близко к забою, а третий – во вторжении Rubble Dyke.

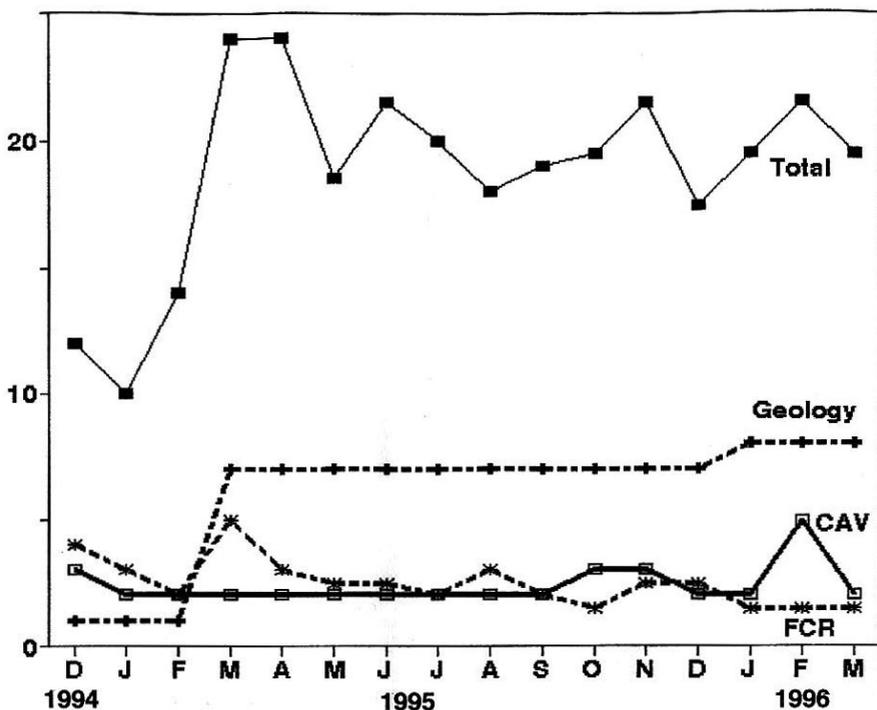


Рис. 4.24. Вариации значений параметров сейсмической опасности на участке 88/28 East

В течение следующих месяцев было улучшено взаимное положение забоев и оба параметра – «геология» и «производство» получили значения 2. К концу 1995г. задние уступы достигли положения целика и обрабатываемая площадь составила от 500 до 1200 м² в месяц. Однако к марту 1996г. остальные уступы приблизились к целику, из-за чего выросла опасность этого сейсмического источника, увеличив параметр CAV.

Для того, чтобы оценить прогнозирующие возможности системы SHA была определена корреляция между оценками SHA и тремя различными показателями проявлений сейсмической активности: внезапными выбросами пород, случаями других зарегистрированных сейсмических событий, а также сейсмическим индексом. При этом «внезапный выброс пород» понимался, как сейсмическое событие, которое вызывает повреждения в подземной экскавации. В период более 19 месяцев с сентября 1994 г. до марта 1996 г. в каждом месяце были отработаны участки, имеющие оценку по системе SHA на 30% выше остальных, т.е. общую оценку 17 и более. Затем для этих выбранных участков (от 5 до 10 из общего числа оцениваемых за месяц 40-50 участков) была установлена корреляция с теми зонами, где наблюдалась сейсмичность с магнитудой более 1,0.

Эта работа показала, что 70% выбранных участков, имеющих наиболее высокие оценки SHA, испытывали повышенную сейсмичность, что позволило сделать вывод о способности системы SHA в большинстве случаев правильно прогнозировать сейсмическую опасность.

Кроме исследований, связанных с решением этой задачи, на шахте была осуществлена большая обучающая персонал программа повышения внимательности и общих знаний принципов горной механики. На рис. 4.25 показаны результаты всех этих усилий.

Еще один метод оценки риска сейсмических событий на шахтах Южной Африки приведен далее.

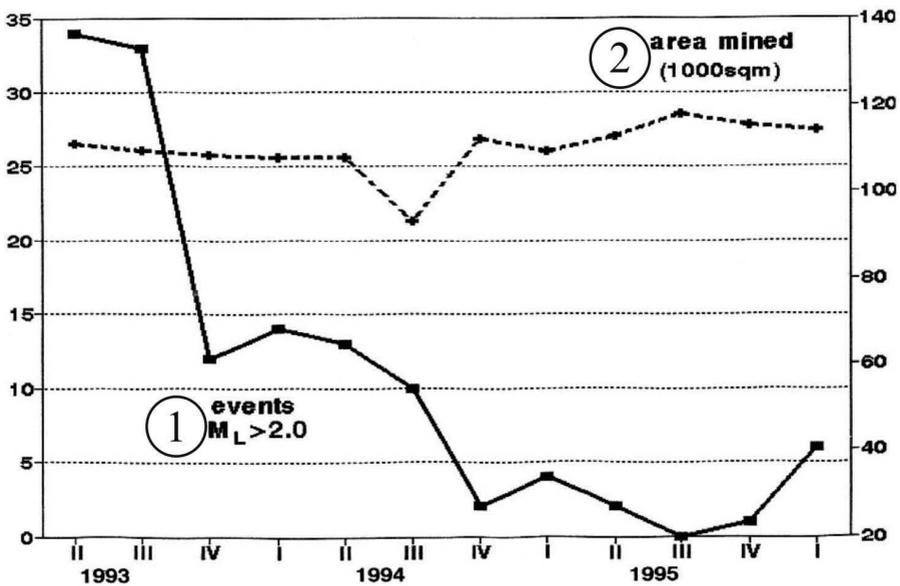


Рис. 4.25. Диаграмма результативности принятых мер по снижению сейсмической опасности

1 – события; 2 – отработанная площадь.

В основу метода положены следующие категории оцениваемых параметров:

P_1 – уровень сдвижения пород;

P_2 – уязвимость экскавации к сдвижению (или обрушению) пород;

P_3 – уровень подверженности людей риску;

P_4 – качество информации.

Каждая категория оценки риска состоит из нескольких параметров.

Категория P_1 включает:

1) P_{1p_1} – совместный параметр, обозначающий максимальную магнитуду события в рассматриваемом районе M_{\max} и расстояние до источника события (табл. 4.39).

Таблица 4.39 – Матрица комбинации M_{\max} и расстояние до источника события

M_{\max}	> 4	5	5	5	5	4	3
	3-4	5	5	5	4	3	2
	2-3	5	5	4	3	2	1
	1-2	5	4	3	2	1	1
	0-1	4	3	2	1	1	1
	0-20	20-50	50-100	100-200	200-500	> 500	
Расстояние до источника, м							

Здесь магнитуда наибольшего возможного сейсмического события M_{\max} понимается, как верхний предел магнитуды для данного региона.

Существуют разные методы для оценки M_{\max} , которые можно обозначить как детерминистские и вероятностные. Часто применяемая детерминистская процедура основывается на эмпирических взаимоотношениях между магнитудой и различными параметрами тектоники массива с его нарушениями или напряжениями пород и темпами высвобождения сейсмической энергии. В большинстве случаев, однако, неопределенность параметра M_{\max} может составлять до одной единицы по шкале Рихтера.

Значение M_{\max} может оцениваться также данными сейсмической истории района с использованием соответствующей статистической процедуры. Компьютерное моделирование позволяет построить правдоподобную картину ожидаемого поведения породного массива и прогнозировать появление сейсмических событий.

2) P_1 p_2 – частота сейсмических событий (табл. 4.40).

Таблица 4.40 – Оценка риска в зависимости от частоты сейсмических событий

Оценка $P_1 p_2$	Интервал между событиями
1	Однажды за срок службы шахты
2	Интервал более 5 лет
3	Более 1 года
4	Более 1 месяца
5	Менее 1 месяца

3) $P_1 p_3$ – распределение сейсмических событий в течение суток/исторические данные (рис. 4.26) (табл. 4.41).

Таблица 4.41 – Оценка риска в зависимости от времени суток, % M_{max}

Оценка $P_1 p_3$	Магнитуда сейсмического события в оцениваемое время суток, % M_{max}
1	0-20
2	20-40
3	40-60
4	60-80
5	80-100

Категория P_2 включает:

1) $P_2 p_1$ – темп высвобождения энергии (табл. 4.42).

Таблица 4.42 – Оценка риска в зависимости от темпа высвобождения энергии, % ERR_{max} (для M_{max})

Оценка $P_2 p_1$	Темп высвобождения энергии, % ERR_{max}
1	0-20
2	20-40
3	40-60
4	60-80
5	80-100

2) $P_2 p_2$ – геологический фактор (табл. 4.43).

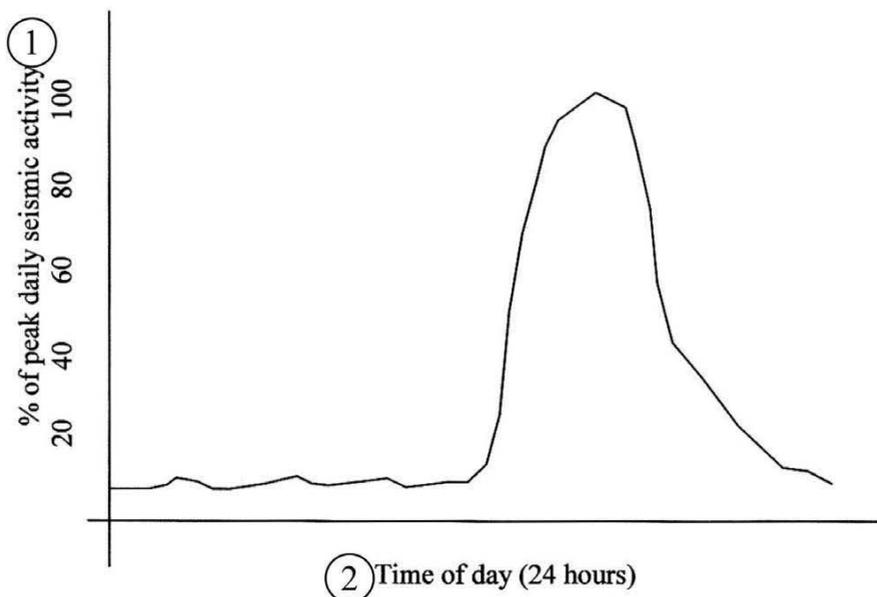


Рис. 4.26. Пример распределения сейсмических событий в течение суток

1 - % максимальной суточной активности; 2 – время суток.

Таблица 4.43 – Оценка риска в зависимости от геологических условий

Оценка $P_2 p_2$	Зависимость риска от геологических условий
1	Риск отсутствует
2	Низкий риск
3	Средний риск (приемлемый)
4	Высокий риск
5	Неприемлемый риск

3) $P_2 p_3$ – крепь подземной полости (табл. 4.44).

При выборе крепи учитываются:

- условия основных транспортных, вентиляционных, участковых выработок, пути доступа к уступам и другим рабочим местам;

- соответствие выбранных видов крепи установленным стандартам для конкретных геологических условий;
- качество и размещение закладочного материала (при применении закладки).

Таблица 4.44 – Оценка риска в зависимости от качества крепи

Оценка $P_2 p_3$	Качество крепи
1	Значительно лучше, чем требуется стандартами
2	Во всех отношениях соответствует стандартам и нормам
3	Соответствует стандартам по большинству требований
4	Соответствует большинству стандартов и норм
5	Несоответствие крепи стандартам. Крезь неприемлема

4) $P_2 p_4$ – уровень сдвижения пород (табл. 4.45).

Этот параметр описывает уязвимость экскавации к сдвигению пород. Здесь учитывается:

- адекватное состояние кровли;
- повреждения при взрывных работах;
- трещиноватость вмещающих пород;
- плоскости напластования;
- прочность породных масс.

Таблица 4.45 – Оценка риска в зависимости от сдвижения пород

Оценка $P_2 p_4$	Сдвигение пород
1	Риск отсутствует
2	Низкий риск
3	Средний риск (приемлемый)
4	Высокий риск
5	Неприемлемый риск

5) P_2p_5 – маршрут выхода людей из места аварии (табл. 4.46).

Таблица 4.46 – Оценка риска в зависимости от маршрута выхода людей

Оценка $P_2 p_5$	Маршрут выхода людей
1	Имеются надежные альтернативные маршруты
2	Маршруты выхода превосходят существующие стандарты
3	Маршруты выхода соответствуют стандартам
4	Альтернативные маршруты отсутствуют
5	Имеющиеся маршруты не пригодны для использования

6) P_2p_6 – влияние места события на увеличение скорости колебания пород. В настоящее время отсутствует метод, который может определить влияние условий конкретного района события на изменения во времени скорости колебаний пород.

Категория P_3 включает:

P_3p_1 – параметр, характеризующий максимальное число людей, подверженных опасности на данном рабочем месте или транспортном маршруте (табл. 4.47).

Таблица 4.47 – Оценка риска в зависимости от числа людей, подверженных опасности

Оценка $P_3 p_1$	Число людей, подверженных опасности, % от максимального числа занятых на рабочем месте
1	0-20
2	20-40
3	40-60
4	60-80
5	80-100

Категория P_4 включает:

1) P_{4p1} – параметр, характеризующий планы горных работ (табл. 4.48).

Таблица 4.48 – Оценка риска в зависимости от соответствия плана работ геологическим условиям

Оценка P_{4p1}	Соответствие плана работ геологическим структурам
1	Планирование работ полностью соответствует знаниям о геологических структурах
2	Планирование учитывает знания о существенных геологических структурах
3	Адекватное планирование с приемлемыми знаниями о геологических структурах
4	Некачественное планирование или недостаточное знание геологической обстановки
5	Неудовлетворительное планирование или плохое знание геологической обстановки

В оценке P_{4p1} учитывается:

- текущее положение горных работ;
- соответствие фактического положения горных работ планируемому;
- знания расположения и ориентации геологических неоднородностей;
- природа геологических неоднородностей и их контакт с породным массивом.

2) P_{4p2} – сейсмический мониторинг (табл. 4.49).

Здесь учитывается:

- качество регистрируемых данных, включая тщательную локализацию и количественную оценку сейсмических параметров;
- чувствительность сети мониторинга;
- качественное описание и интерпретация процессов.

Таблица 4.49 – Оценка риска в зависимости от качества сейсмического мониторинга

Оценка P_{4p_2}	Качество сейсмического мониторинга
1	Соответствие стандартам мониторинга
2	Количественный сейсмический мониторинг, идентификация и интерпретация события, определяемого как внезапный выброс, с чувствительностью равной, по крайней мере, одной единице (или меньше) по шкале Рихтера
3	Сейсмическое событие, определяемое как внезапный выброс, зарегистрированное с достаточной точностью оценки (20%) отторгнутых породных масс
4	Событие регистрируется региональной сейсмической системой, отмечающей магнитуды $M_L > 2$ или имеющей точность локализации более 200 м
5	Сейсмический мониторинг отсутствует

3) P_{4p_3} – ранние предупреждающие признаки сейсмического события (табл. 4.50).

Таблица 4.50 – Оценка риска в зависимости от ранних предупреждающих признаков сейсмического события

Оценка P_{4p_3}	Ранние предупреждающие признаки
1	Концепция и методология ранних признаков сейсмического события применяется для своевременной эвакуации персонала (или предотвращения их входа)
3	Сейсмическая интерпретация формирует основу для предварительных управленческих решений по предотвращению, контролю и прогнозированию выбросов
5	Предварительные управленческие решения по предотвращению, контролю и прогнозированию выбросов отсутствуют

4) P_{4p_4} – оценку риска для интервала времени и площади выполнения рабочей операции (табл. 4.51).

Таблица 4.51 – Оценка риска в зависимости от интервала времени и площади выполнения операций

Оценка P_{4p_4}	Интервал времени и площадь выполнения рабочих операций
1	Оценка риска производится для индивидуальной площади выполнения операций, например, для добычной панели или забоя штрека. Интервал времени определяется скоростью изменения параметров, например, увеличением сейсмичности в геологической структуре, близкой к рабочему месту
3	Оценка риска производится ежемесячно для панели (рабочего места)
5	Оценка риска производится в интервале более квартала или для полного объема работ в шахте

5) P_{4p_5} – оценку (историю) имеющегося опыта, в базу данных которого входят (табл. 4.52):

- ранние попытки оценки риска;
- решения по управлению рисками и их результаты;
- сейсмические данные;
- сейсмический ущерб;
- несчастные случаи, вызванные сейсмическими событиями;
- уровень добычи;
- расположение забоя и геологических структур.

6) P_{4p_6} – оценка влияния исходных данных на результаты прогнозирования риска (табл. 4.53).

Таблица 4.52 – Оценка риска в зависимости от полученного опыта

Оценка P_{4p5}	Полученный опыт
1	Высокое качество данных
2	Хорошее качество данных
3	Приемлемое качество данных
4	Неэффективное качество данных
5	Данных о предыдущем опыте нет

Таблица 4.53 – Оценка влияния исходных данных на результаты прогнозирования риска

Оценка P_{4p6}	Оценка влияния исходных данных
1	Отчетливая зависимость результатов оценки рисков от исходных данных
2	Хорошая связь исходных данных с результатами оценки рисков
3	Средняя связь исходных данных с результатами оценки рисков
4	Слабая связь исходных данных с результатами оценки рисков
5	Связь исходных данных и результатов оценки рисков отсутствует

Интегрированная оценка риска определяется следующим образом.

Средняя оценка категории равна:

$$P_{i_{cp}} = \frac{(P_{i_1} + P_{i_2} + \dots + P_i)}{n}$$

Интегрированная оценка риска составит произведение:

$$P_{риска} = P_{1cp} \times P_{2cp} \times P_{3cp} \times P_{4cp}$$

Ранжирование относительных уровней риска осуществляется следующим образом (табл. 4.54).

Таблица 4.54 – Относительный уровень риска

Интегрированная оценка Р риска	Оценка относительного уровня риска	
	количественная	качественная
< 4	1	Очень низкий
< 36	2	Низкий
< 144	3	Средний
< 400	4	Высокий
< 625	5	Очень высокий

Глава 5. Опыт работы шахт района Coeur d'Alene в условиях выбросоопасности пород

5.1 Общие сведения

Район рудных шахт, добывающих свинец, цинк и серебро Coeur d'Alene расположен в северной части штата Idaho, США, рис. 5.1. В настоящее время в районе действует две шахты: Sunshine, добывающая серебро из многочисленных жил, и Lucky Friday, добывающая серебро, свинец и наибольшее количество цинка. Возобновляется работа шахты Galena, закрытой ранее из-за низких цен на серебро. В границах района расположена также закрытая шахта Star. Все эти шахты опасны по внезапным выбросам пород.

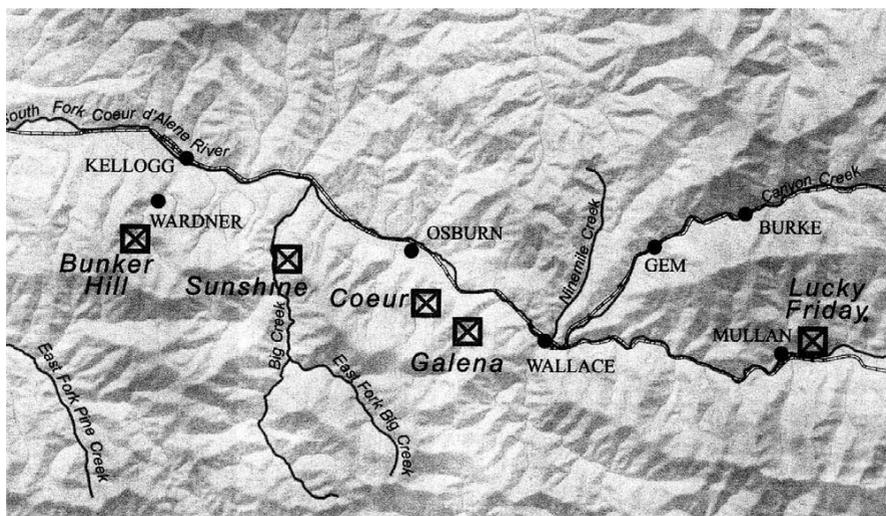


Рис. 5.1. Район Coeur d'Alene, штата Idaho, США

Шахта Lucky Friday – самая сейсмически активная, как в районе Coeur d'Alene, так и во всей Северной Америке (США и Канаде): события с магнитудой более 2,5 до принятия противовыбросных мер случались в среднем каждые 2 месяца.

На шахте до ее временного закрытия в 1986 г. из-за низкого уровня цен на металлы применялся традиционный восходящий порядок отработки рудного тела. Когда шахта была снова открыта, на ней, начиная с субгоризонта 5400, перешли к длиннотрапной системе разработки с потолкоуступным забоем и закладкой выработанного пространства. Система устраняет опорные целики, которые были источником значительной сейсмической опасности.

Рудное тело шахты Lucky Friday представляет собой жилу, имеющую в плане S-образную форму, распространяющуюся по горизонтали на расстояние около 460 м. Ответвления жилы простираются на длину более 610 м. Жила состоит преимущественно из галенита (свинцовой руды) с включениями кварца, сидерита и изменяется по мощности от 0,6 м до 9 м, составляя в среднем 1,5 м. Рудное тело залегает под углом от 70° до 90° к югу и востоку. В настоящее время работы ведутся на глубине более 1,5 км с производительностью 900т/сут.

Район характеризуется нарушениями и складками, многие из которых пересекают рудное тело. Его ограничивают наиболее заметные из нарушений – North и South Control. Крупная складка Hook Anticline разделяет шахту на южное и восточное крылья.

Залегание рудного тела, основные решения по его вскрытию и отработке, состояние поля напряжений показаны на рис. 5.2-5.7.

Породные массы, окружающие залежь, состоят из мощного кварцита с включением аргиллита мощностью менее 5см. Массив отличается значительными изменениями поля напряжений, определяющего интенсивную и концентрированную сейсмичность и выбросоопасность при экскавации руды. Внезапные выбросы пород на шахте стали обычными, когда ее глубина превысила 800 м. Они были связаны с наличием твердого кварцита и с высокими горизонтальными напряжениями.

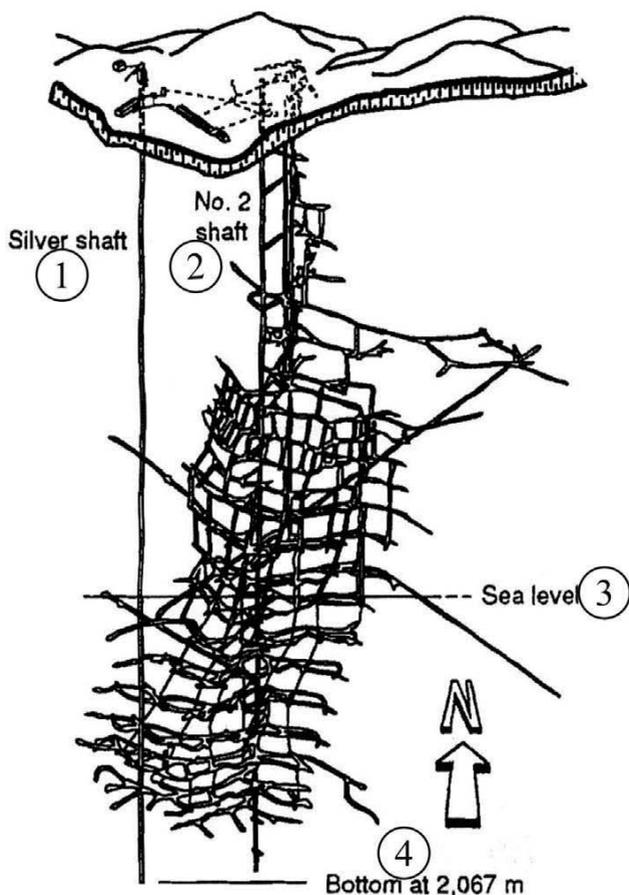


Рис. 5.2. Схема вскрытия шахты Lucky Friday

1 – ствол «серебряный»; 2 – ствол 2; 3 – уровень моря; 4 – нижняя граница.

Шахта Sunshine, расположенная в центре района Coeur d'Alene, добывает руду серебра с производительностью примерно 900 т/сут. Месторождение шахты залегает в твердых кварцитах, склонных к внезапным выбросам. Под кварцитами находится слабый аргиллит. Породные слои простираются с востока на запад и падают под углом 77° к югу. Рудное тело наклонено по простираению на 80° в северо-западном направ-

лении и падает под углом 55° к горизонту (рис. 5.8). На гор. 1400 горными работами вскрыто нарушение со сдвигом 1,2 м.

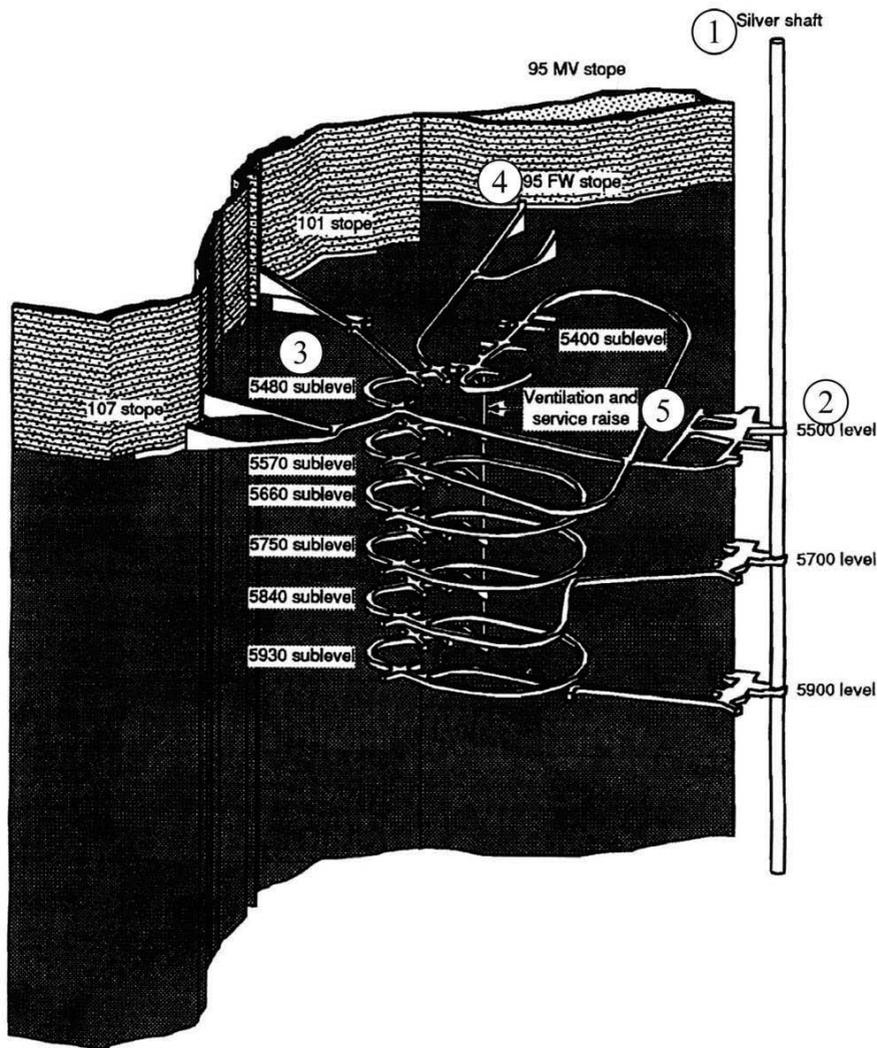


Рис. 5.3. Модель вскрытия рудного тела шахты Lucky Friday
 1 – ствол «серебряный»; 2 – горизонты; 3 – субгоризонты; 4 – уступы; 5 – вентиляционные и обслуживающие восстающие выработки.

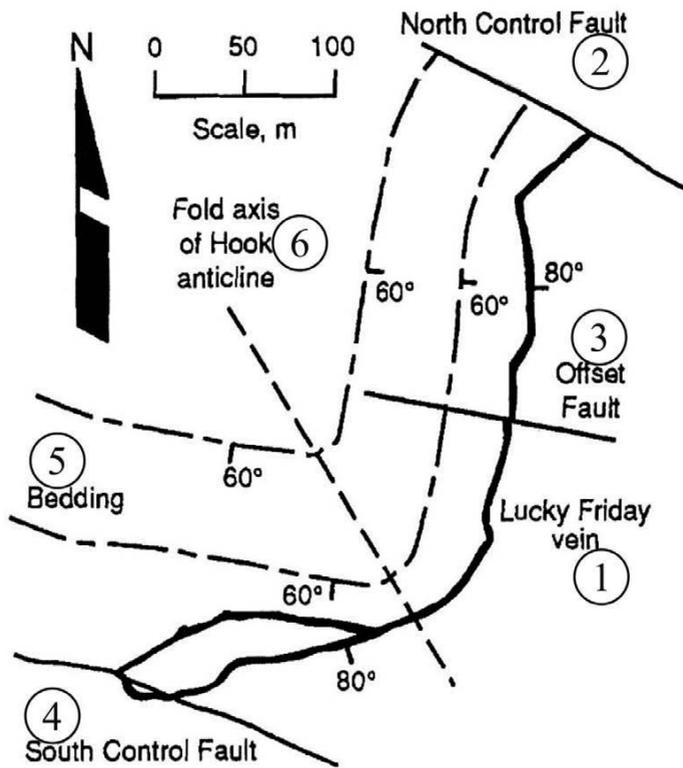


Рис. 5.4. Главные геологические структуры шахты **Lucky Friday**
 1 – рудное тело; 2 – нарушение North Control; 3 – нарушение Offset;
 4 – нарушение South Control, 5 – напластования; 6 – ось антиклинали
 Hook.

Добыча руды ведется потолкоуступными забоями с закладкой выработанного пространства.

Горный массив характеризуется высокими горизонтальными напряжениями. При бурении рудоспусков в разведочных скважинах отмечалось образование породных дисков, ориентированных перпендикулярно максимальным горизонтальным напряжениям и напластованию. Подземные полости испытывают необычно высокую концентрацию внезапных выбросов и другой сейсмической активности.

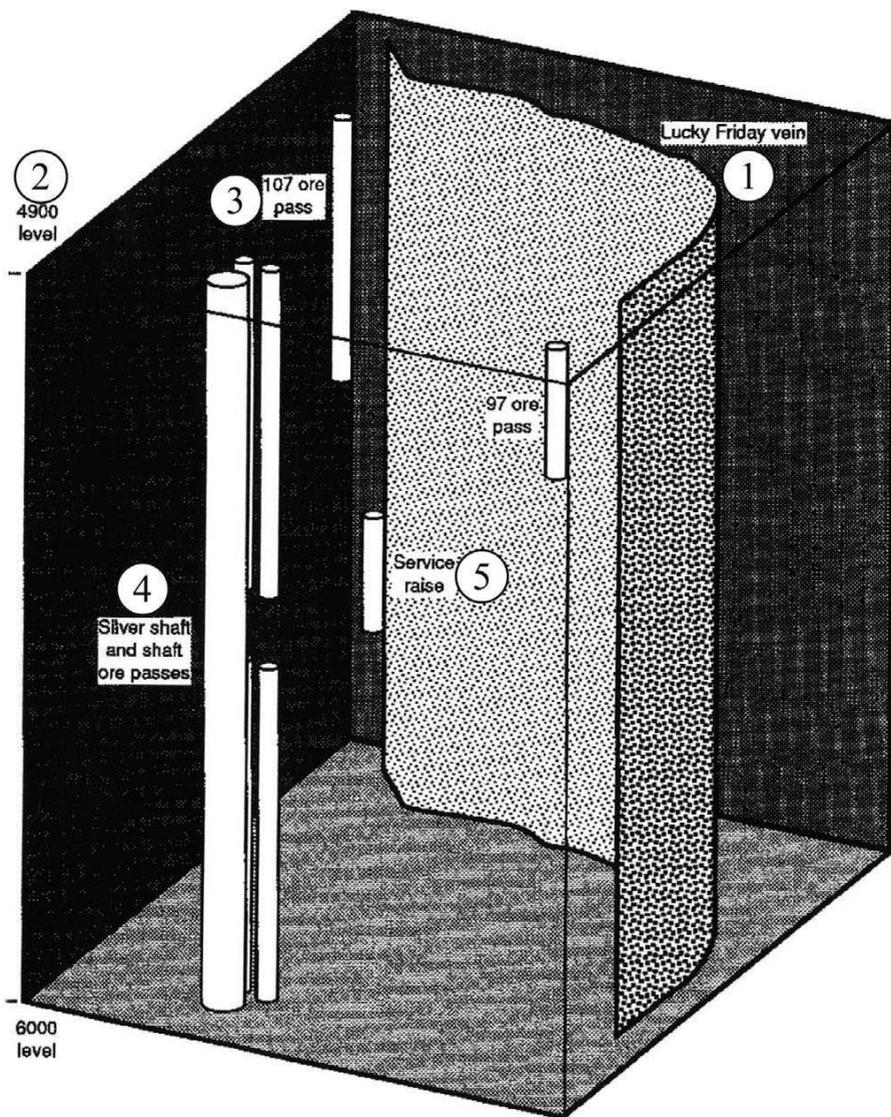


Рис. 5.5. Система вертикальных выработок – стволов, рудоспусков, восстающих
1 – рудное тело; 2 – горизонт; 3 – рудоспуск; 4 – ствол «Серебро» и рудоспуски; 5 – обслуживающая восстающая.

a)

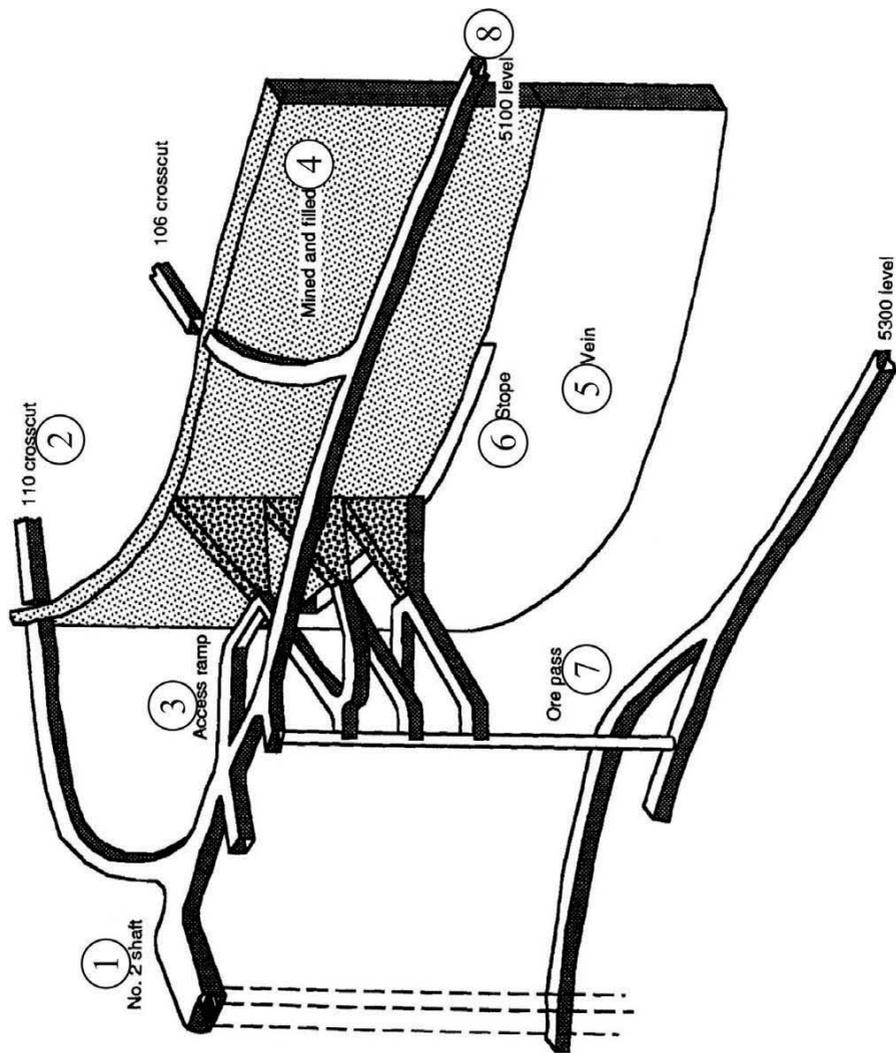


Рис. 5.6. Вскрытие и отработка горизонтов шахты Lucky Friday

6)

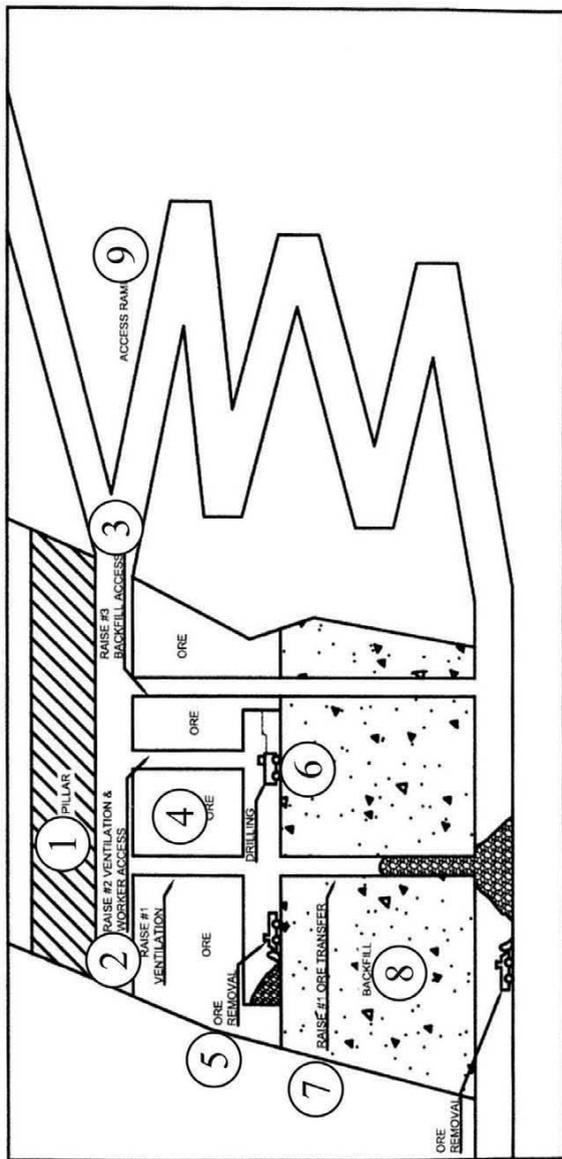


Рис. 5.6. Вскрытие и отработка горизонтов шахты Lucky Friday (продолжение)

B)

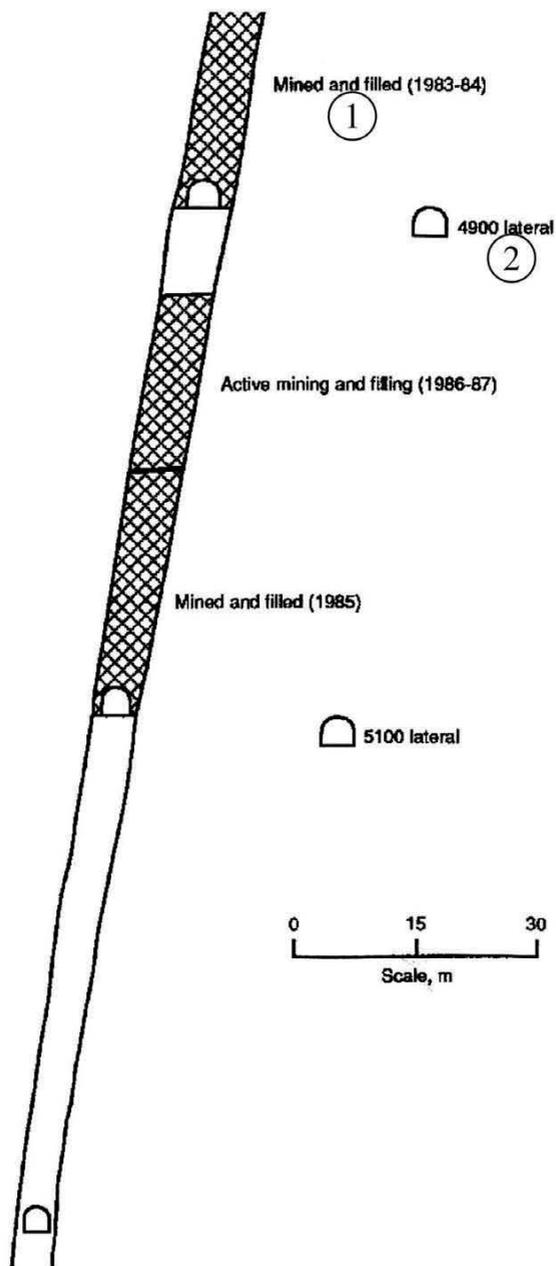


Рис. 5.6. Вскрытие и отработка горизонтов шахты Lucky Friday (продолжение)

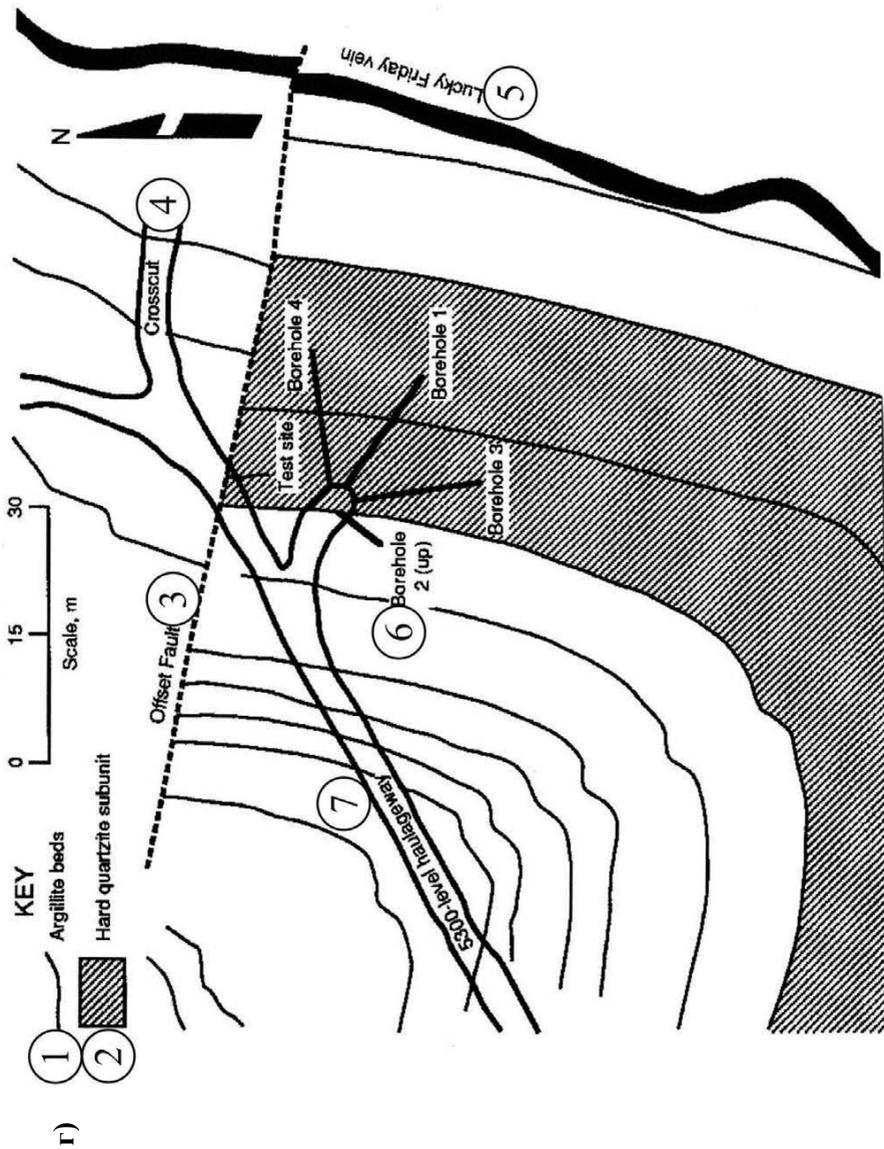


Рис. 5.6. Вскрытие и отработка горизонтов шахты Lucky Friday (окончание)

Объяснения к рис. 5.6:

а) общая схема.

1 – ствол 2; 2 – квершлаг; 3 – рампа доступа; 4 – отработанная и заполненная закладкой часть рудного тела; 5 – рудное тело; 6 – уступ; 7 – рудоспуск; 8 – транспортный горизонт.

б) схема добычных работ при потолкоуступной системе разработки.

1 – целик; 2 – вспомогательная и вентиляционная восстающая; 3 – восстающая для закладочных работ; 4 – руда; 5 – погрузка породы; 6 – бурение; 7 – рудоспуск; 8 – закладка; 9 – главная рампа.

в) вертикальный разрез.

1 – отработано и заполнено закладкой; 2 – транспортный горизонт.

г) схема вскрытия рудного тела на гор. 5300.

1 – аргиллит; 2 – твердый кварцит; 3 – нарушение; 4 – участковый квершлаг; 5 – рудное тело; 6 – разведочная скважина; 7 – транспортный горизонт.

Источником сейсмических событий служат срезающие движения плоскостей нарушений. На рис. 5.8 показана проекция места выброса, случившегося 13.05.94 г., во время которого погиб один из рабочих и был травмирован другой, после чего на гор. 4400 были проведены интенсивные геофизические исследования сейсмоопасности.

Шахта Galena, добывающая серебряную руду, применяет потолкоуступную отработку руды с закладкой выработанного пространства. Рудное тело вскрывается вертикальными стволами и горизонтальными квершлагами, формирующими горизонты высотой 90 м. Уступы длиной около 30м обрабатываются горизонтальными забоями последовательных вертикальных горизонтов.

Вскрывающие квершлагы имеют сечения 3 x 3 м, штреки, проводимые по рудному телу варьируются в ширине от 1,5 м до 4,2 м и в высоте от 2,4 м до 3 м.

Внезапные выбросы происходят, когда напряжения в породном массиве превосходят предел упругости, и аккумулированная в нем энергия мгновенно высвобождается. Рудное

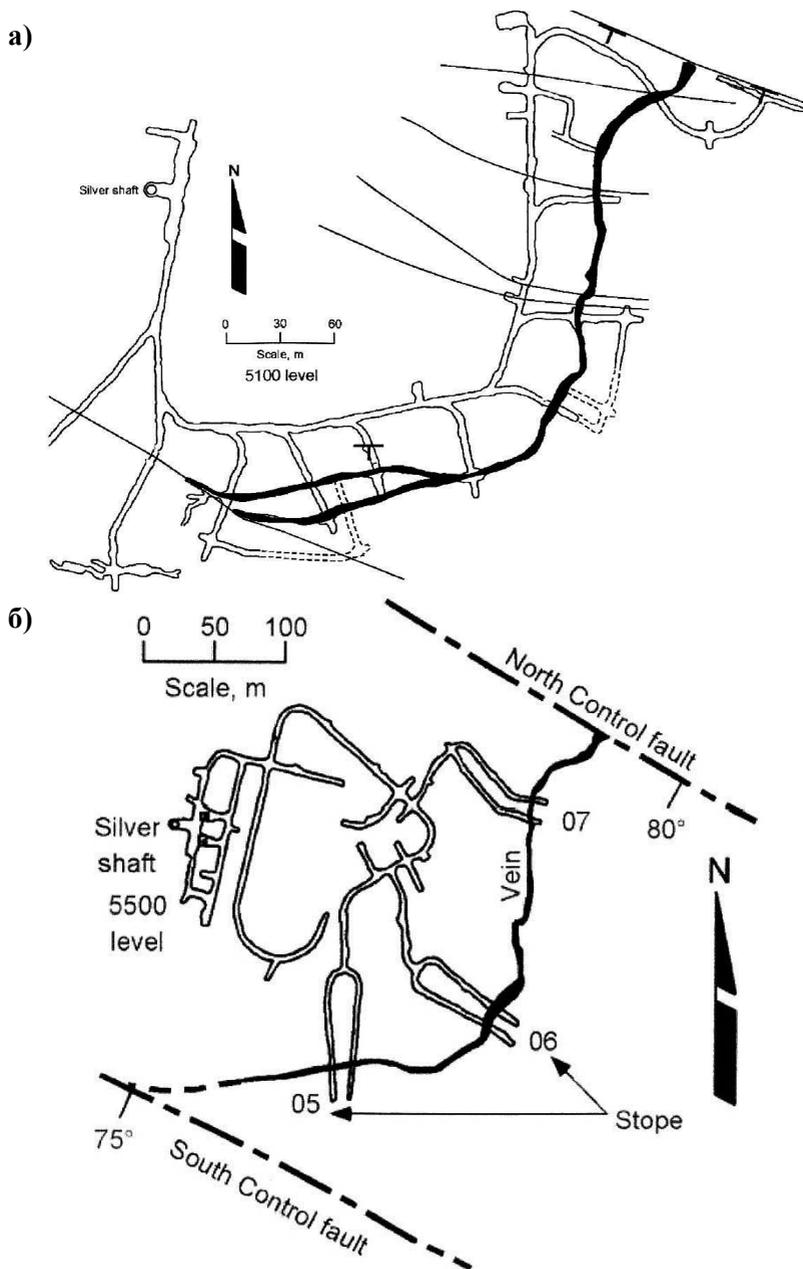


Рис. 5.7. Планы горизонта 5100 и субгоризонта 5500 шахты Lucky Friday

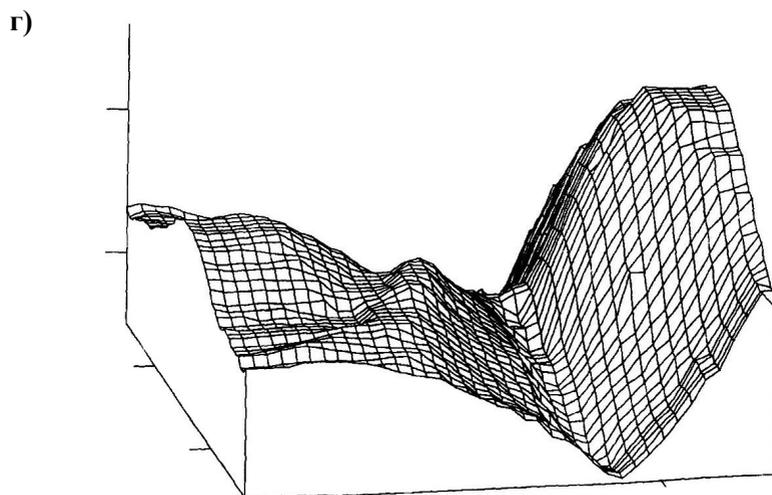
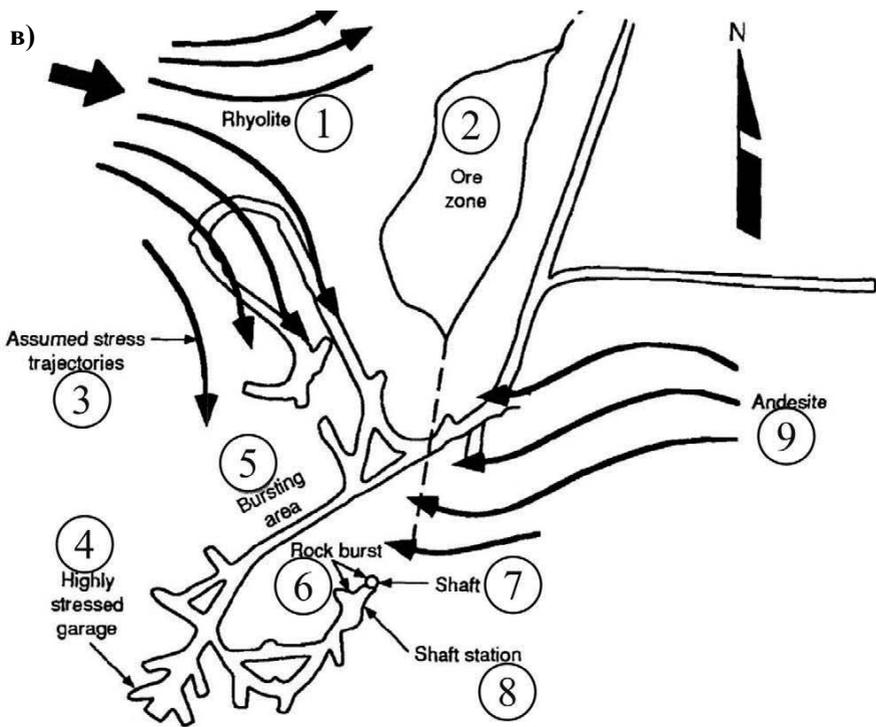


Рис. 5.7. Планы горизонта 5100 и субгоризонта 5500 шахты Lucky Friday (продолжение)



Рис. 5.7. Планы горизонта 5100 и субгоризонта 5500 шахты Lucky Friday (окончание)

Объяснения к рис. 5.7:

а) план горизонта 5100.

б) план субгоризонта 5500.

в) напряженные условия и предполагаемое поведение пород.

1 – риолит; 2 – руда; 3 – предполагаемые траектории напряжений; 4 – высоко напряженный гараж; 5 – выбросоопасная зона; 6 – внезапный выброс пород; 7 – ствол; 8 – сопряжение ствола с околоствольным двором; 9 – андезит.

г) компьютерная модель напряжений в антиклинальной складке Ноок.

д) концентрация сейсмичности и внезапных выбросов возле осевой плоскости антиклинали Ноок.

1 – сейсмическое событие; 2 – нарушение.

тело залегает в хрупких кварцитах и аргиллитах, в нарушенных зонах которых на глубине более 650м происходит концентрация напряжений, приводящая к внезапным выбросам пород.

Шахта Star была самой глубокой свинцово-цинковой шахтой в мире. Рудная залежь здесь расположена вдоль вертикальной нарушенной зоны Morning East Fault и имеет размер по простиранию около 1200 м (рис. 5.9) со средней шириной забоя 3 м. Продуктивная жила менее крепка, чем вмещающие ее породы – твердые хрупкие кварциты, аргиллитовые и глинистые кварциты – и пересекает почти вертикально окружающие слои, расположенные под углами, варьирующимися от 30° до 60° . Жила разрезана на ряд сопряженных ответвлений. Руда в пределах месторождения добывалась из почти 20 отдельных жил.

Шахтное поле вскрыто многочисленными туннелями и стволами, пройденными с поверхности и с рабочих горизонтов (слепыми). Такой слепой ствол № 4 в поздних 1960-х гг. был построен с главного подъемного гор. 2000 на гор. 7100, а затем углублялся с интервалами 61 м по мере ведения горных работ до гор. 8100 (глубина 2440 м от уровня моря).

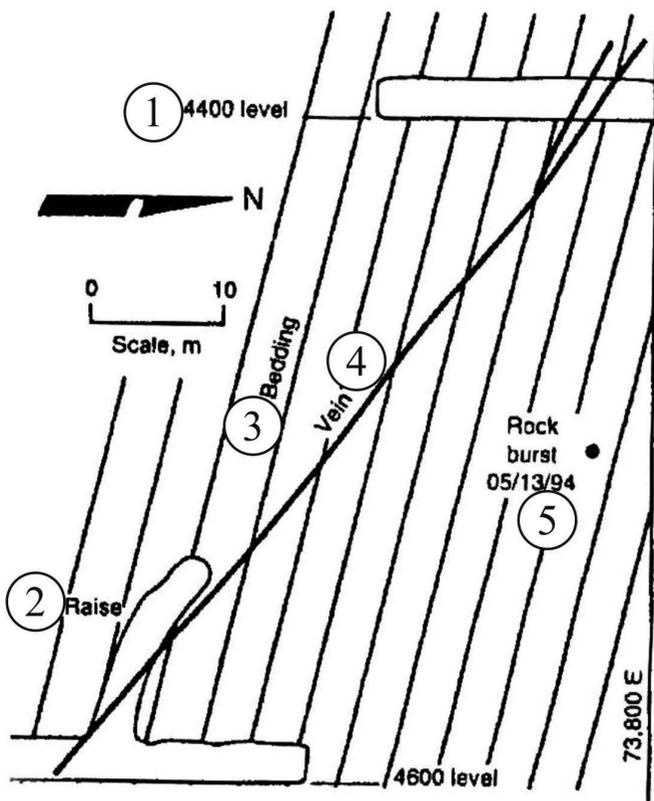


Рис. 5.8. Сечение напластования шахты Sunshine

*1 – горизонт; 2 – рудоспуск; 3 – напластование; 4 – рудное тело;
5 - проекция места внезапного выброса.*

Для поддержания забоев в сложных условиях, встреченных на большой глубине, применялась система разработки с закладкой выработанного пространства и венцовой крепью в забое. Подход к уступам осуществлялся участковыми квершлагами с погоризонтных штреков, пройденных на расстоянии 20-40 м от лежачего бока жилы. Стены рабочих уступов, кроме деревянных венцов, поддерживались также анкерными болтами и металлической сеткой. Уступы отрабатывались восходящими слоями высотой 3 м. Такими же циклами закладывалось выработанное пространство.

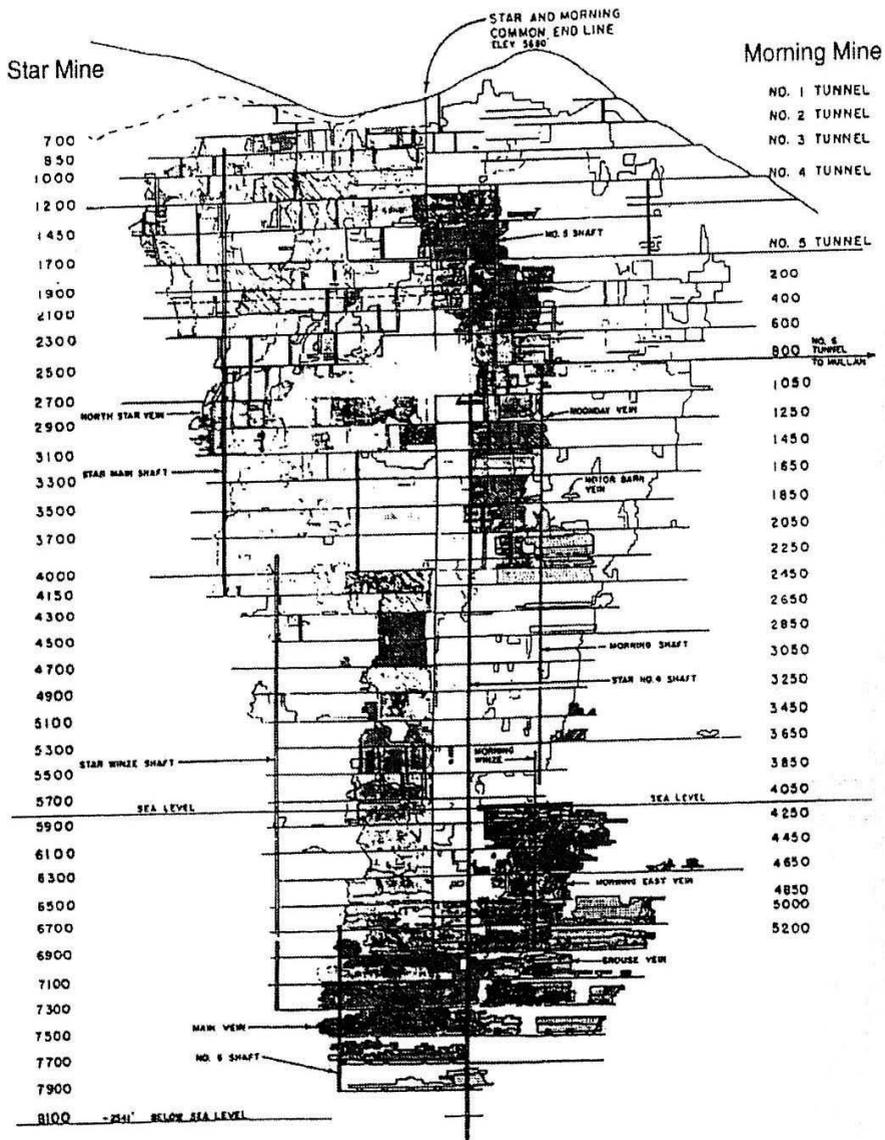


Рис. 5.9. План горных работ шахты Star

Первые зарегистрированные на шахте внезапные выбросы породы относятся к ранним 1940-м гг. во время работ ни-

же гор. 3700. Эти выбросы были нечастыми и не приносили большого ущерба. Они вызывались, главным образом, наличием целиков, оставляемых при добыче под или над погоризонтными выработками. Несколько крупных выбросов в эти годы были отмечены также в прилегающих горных работах соседней шахты Morning на ее горизонте 4450 (что соответствует гор. 6100 шахты Star).

Со вскрытием гор. 6900 шахты Star тяжелые выбросы были встречены при проходке рудоспусков и погоризонтных выработок. Первый выброс, который привел к двум смертельным случаям, произошел в 1964 г., когда уступы №4 и №8 приблизились друг к другу, образовав целик. Подобные условия, хотя и не такие сложные, возникли на гор. 7100. Вместе с тем, более глубокий горизонт 7300 был вскрыт и разрабатывался с относительно малыми выбросами. Его подготовка задержалась на 2 года из-за неготовности ствола №4, однако, неясно, послужило ли это обстоятельство причиной снижения выбросоопасности.

Из серии выбросов в 1974 г. пять произошло на гор. 7500 и вызвало перемещение 2000 т породы. Была предпринята попытка изменить геометрию уступов и разгружать их бурением и взрыванием скважин длиной 4 м вдоль стен уступа с расстоянием между ними 2 м, что позволило создать предварительный вруб. Эти скважины заряжались и взрывались после выполнения закладочных работ. Однако, к 1975 г. общее число выбросов увеличилось до 21, причем 16 из них были вызваны горными работами на гор. 7500. Ими было перемещено 1500 т породы.

Согласно общим принципам классификации выбросов (см. главу 2) в районе Coeur d'Alene они могут быть разделены на три главных вида - напряженные выбросы, выбросы в целиках и выбросы скольжения. Виды выбросов имеют различную степень опасности в разных шахтах района (табл. 5.1) (сведения даны за 60-летний период наблюдений).

Таблица 5.1 – Смертельные случаи, вызванные внезапными выбросами пород

Шахта	Вид выброса		
	напряженный	в целиках	скольжения
Lucky Friday	-	2	2
Sunshine	3	2	-
Galena	2	6	-
Star/Morning	3	1	-
Всего	8	11	2

Возникновение внезапных выбросов на шахтах района определяется наличием существующих плоскостей породных слоев и другими неоднородностями массива. Эти слои круто наклонены, что является продуктом крупномасштабной складчатости в ходе ранней тектонической истории месторождения. Последующий тектонизм разорвал многие из осадочных пород. Даже мощные относительно гомогенные напластования внутренне разделены на тонкие слои и были подвержены частичному механическому расщеплению. Поэтому в породных стенах подземных полостей наблюдаются крутопадающие плиты варьируемой толщины.

Слоистость пород определяет как выбор и параметры крепи подземных полостей, так и возможность скольжения породных масс по плоскостям напластования или нарушения, что объясняется следующими механизмами:

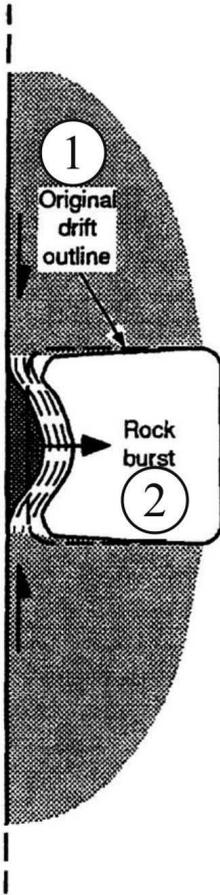
1. Для прогиба существующих слоев пород требуются меньшие напряжения, чем для нового расслоения массива такого же качества. Не скрепленные болтами тонкие породные слои, близкие к вертикальному положению, могут быть легко деформируемы прогибом даже на относительно небольшой глубине и только одним грузом – весом покрывающей толщи пород. Тесно расположенные существующие сочленения породных блоков также вовлекаются в обрушение по этой причине.

2. Нарушения и плоскости напластования физически изолируют прогибающиеся слои от примыкающих породных масс. Скольжению вдоль этих плоскостей не препятствует связь породных масс на противоположной стороне геологической структуры (рис. 5.10, 5.11). Скольжение вдоль этих плоскостей дает возможность передать относительно большое количество энергии упругих напряжений относительно малому объему отторжения пород. Способность пород разрушиться этим механизмом – главная причина высокой вероятности выбросов в районе. Связанные с тектоникой напряженные выбросы в крутонаклонных структурах подобно обычному механизму возникновения напряженных выбросов и выбросов в целиках получают свою относительно большую энергию от упругой энергии напряжений окружающих породных масс.

Несколько факторов значительно увеличивают вероятность возникновения связанных с тектоникой напряженных выбросов. Так, при пересечении подземной полостью породных слоев или нарушения под малым углом увеличивается вероятность полного обнажения породных слоев, находящихся на критическом уровне напряжений. Некоторые из этих слоев, возможно, также связаны тектонически с реальными нарушениями и поэтому будут уязвимы к соответствующему механизму выброса. Кроме того, при крутопадающем напластования, которое срезано под малым углом протяженной полостью и механически обособлено от прилегающего массива плоскостями напластования, заполненными глинистым аргиллитом, в полости создается пролет больший, чем если бы массив был монолитным. Слои, срезаемые нарушением с одной стороны полости, из-за образующейся несимметричности нагрузок создают непропорционально высокую напряженность на противоположной стороне полости. Наконец, поскольку кварцит имеет более высокий модуль упругости, чем аргиллит, равное количество напряжений, параллельных породным слоям, вызывает непропорционально высокие на-

Рис. 5.10. Механизм напряженного выброса, связанный с нарушением

1 – начальный контур штрека; 2 – внезапный выброс.



грузки в слоях кварцита и, соответственно, уменьшают нагрузку на прилегающие слои аргиллита. Это частично объясняет более высокую частоту (повторяемость) выбросов, наблюдаемых в кварцитах.

Связанные с тектоникой напряженные выбросы (fault – bounded strain bursts) воздействуют на горизонтальные протяженные полости такие, как участковые и погоризонтные транспортные выработки, однако вертикальные и наклонные полости – стволы, рудоспуски, другие скважины большого диаметра также чувствительны к этому виду воздействия. Поскольку нарушения и напластования в рассматриваемом районе в общем случае имеют крутое падение, подобные полости обычно встречают эти геологические структуры под малыми углами. Такие условия, а также воздействие неблагоприятно ориентированных тектонических нагрузок, приводят к сложным проблемам управления горным давлением в вертикальных выработках шахты Lucky Friday.

Специфические проявления сейсмичности в шахте возникают в наклонных квершлагах – транспортных рампах и отражают почти постоянное движение массива вдоль плоскостей напластования по направлению к лежащему боку месторождения. Сейсмические события, происходящие в нем и вызванные этим скольжением, имеют магнитуду от 2 до 4. Их центры расположены обычно в 30-70 м от ближайшей шахт-



Рис. 5.11. Напряженный внезапный выброс пород, связанный с нарушением

ной полости. Несмотря на значительное количество энергии, реализуемой при таких событиях, действительный ущерб час-

то незначителен и выражается в сжатии заполнений трещин, растрескивании породных слоев и незначительных локализованных повреждениях стен и стоек крепи. Так, выброс с магнитудой 4 в августе 1994 г. (рис. 5.12) можно интерпретировать, как результат скольжения массива, когда высоко напряженная породная стена двигалась вдоль плоскости существующего нарушения. Подобное понимание базируется, в частности, на наблюдениях местного интенсивного сжатия песчаной закладки выработанного пространства, развивающейся трещиноватости и прогиба пород в добычных забоях.

На шахте отмечались также повреждения в участковых квершлагах (crosscuts), вызванные выбросами скольжения, которые проявлялись в виде подъема почвы со стороны целиков и ее опускания на противоположной стороне выработки (рис. 5.13). Такой вид выброса часто имеет и более тяжелые последствия, вызванные спецификой геотехнических условий шахты.

Установленная здесь обширная система мониторинга регистрирует сейсмические события и идентифицирует места источников. Примерно 90% всей сейсмичности происходит возле действующих уступов. Наибольшие из событий случаются из-за скольжения массива по плоскостям напластований. Оставшиеся 10% событий возникают, главным образом, вне этой зоны, включая события с наибольшей магнитудой, причиной которых является около 90% всей сейсмической энергии, высвобождаемой в шахте. Такие события расположены близко к известным главным нарушениям и вызывают основные повреждения в местах, где плоскости главных нарушений пересекают развивающиеся шахтные полости – вскрывающие квершлаг, подготавливающие штреки, строящиеся камеры.

Эти повреждения проявляются, главным образом, с перемещением стен плоскостей вовнутрь сечения, особенно, в зонах напластований и сочленений, содержащих отчетливые белые глинистые наполнения (рис. 5.14) и в зонах возросшей трещиноватости. Породные слои в пределах этих зон часто

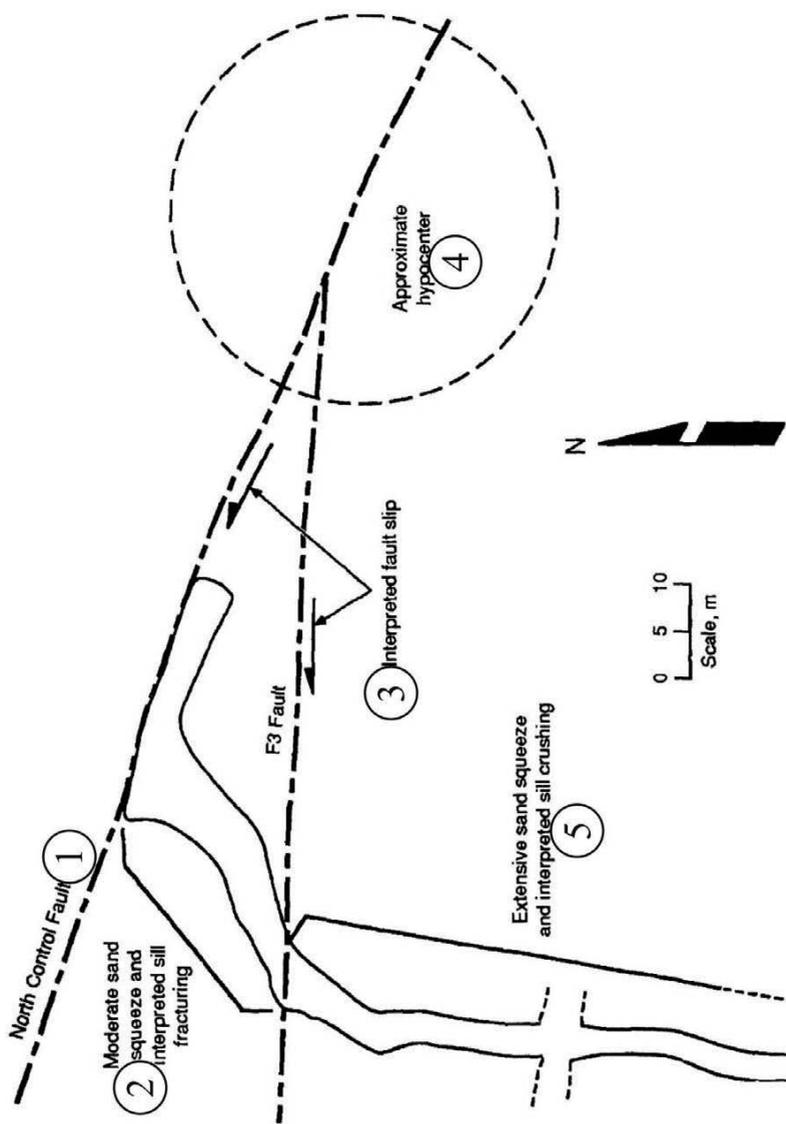


Рис. 5.12. Схема внезапного выброса скольжения на шахте Lucky Friday

1 – нарушение North Control; 2 – среднее сжатие песчаной закладки и трещинообразование в почве; 3 – скольжение в нарушении; 4 – примерный гипоцентр; 5 – интенсивное сжатие песчаной закладки и разрушение почвы.

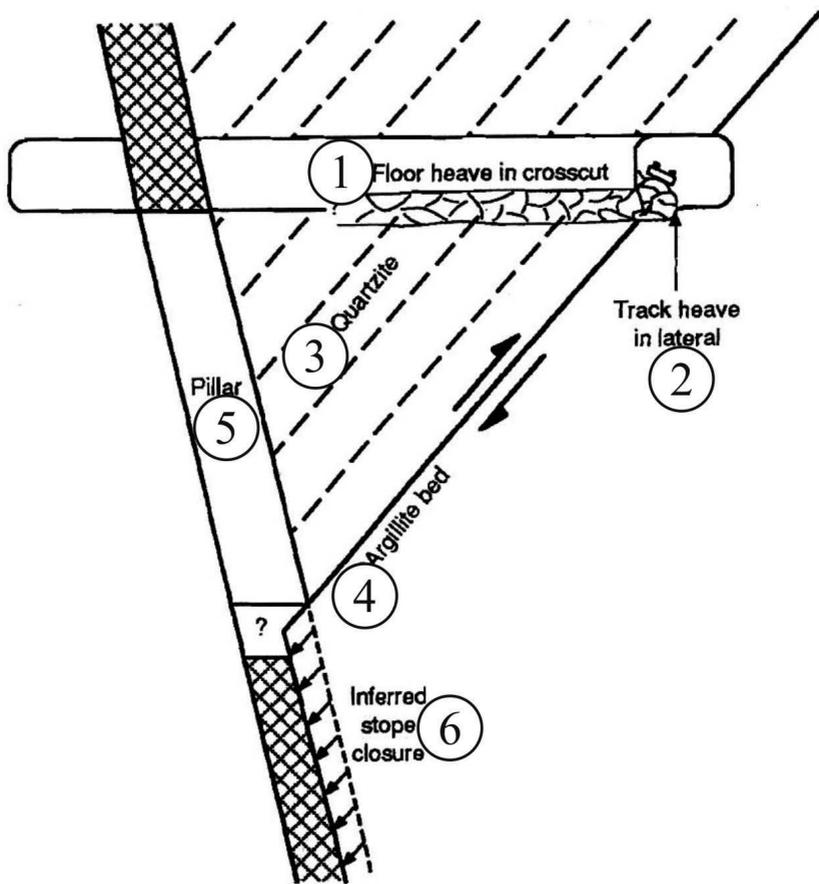


Рис. 5.13. Закрытие уступа скольжением пород по напластованию
 1 – подъем почвы в квершлага; 2 – подъем путей в ответвлении;
 3 – кварцит; 4 – напластование аргиллита; 5 – целик; 6 – закрытие уступа.

раздроблены, повернуты и разорваны.

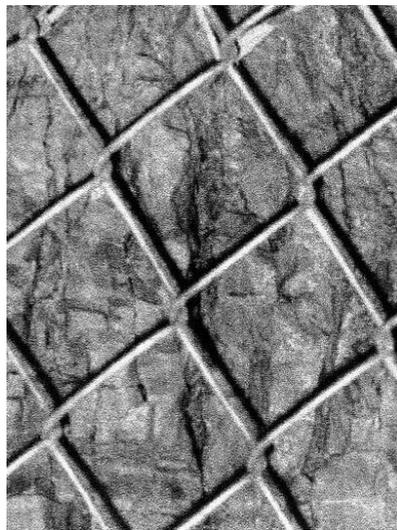
Срезающие движения пород в стенах полостей наиболее очевидно проявляются в трещинах, которые начинают развиваться в набрызгбетонной крепи вскоре после нанесения ее слоя (рис. 5.15).



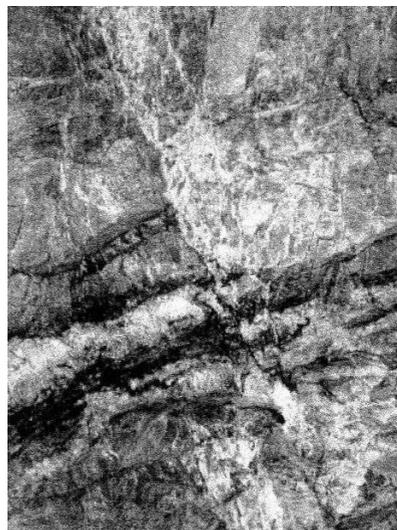
а)



в)



б)



г)

Рис. 5.14. Глинистые заполнения в зонах напластований и сочленений (а), расширение трещин в стенах уступа (б), разрушенная зона, сформированная срезом, индуцированным горными работами

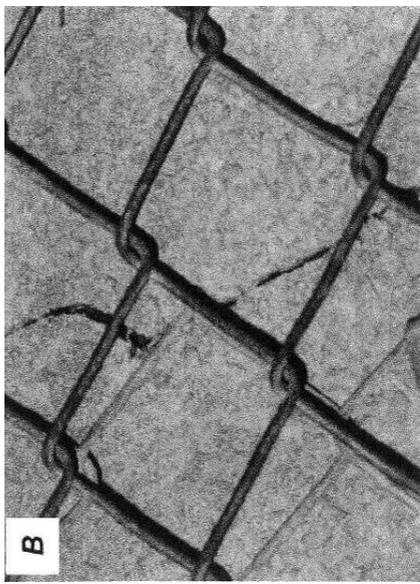


Рис. 5.15. Трещины, формирующиеся в набрызгбетоне из-за движения пород по напластованию

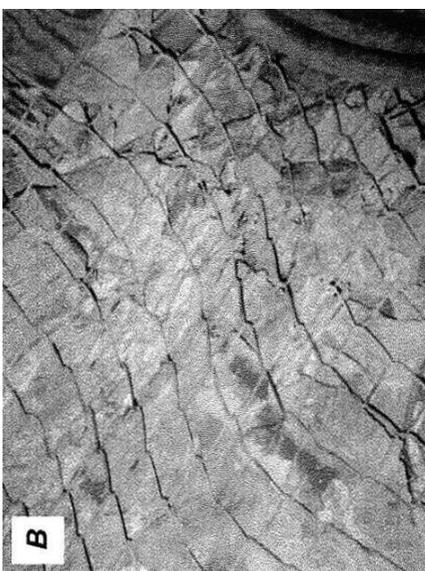
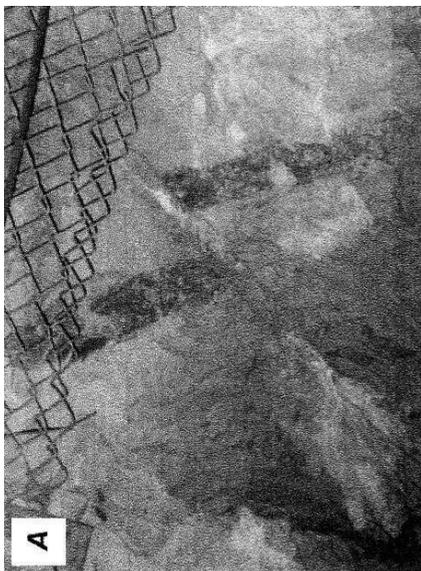


Рис. 5.16. Закрашенные метки, показывающие скопление плоскостей напластования

Объяснения к рис. 5.15:

А) расширение трещины над слоем аргиллита; В) трещины, параллельные напластованию, показывающие нормальное скольжение.

Объяснения к рис. 5.16:

А) смещение метки постепенным скольжением за 6-недельный период; В) смещение меток и деформация сетки, развившиеся при выбросе.

На участках вскрывающих кваршлаггов, непосредственно прилегающих к рудному телу в качестве индикаторов сдвига стен применяются закрашенные метки поперек аргиллитовых включений в кварцитовые слои. Эти индикаторы показали прогрессирующее нормальное скольжение (опускание висячего бока) вдоль плоскостей напластования на расстояние до 10 см за месяц и быстрое движение, по крайней мере, до 15 см в ходе сейсмического события (рис. 5.16).

Различные схемы развития трещиноватости, скольжения массива вдоль плоскостей напластования, разрывов при сдвиге слоев возле добычных уступов показаны на рис. 5.17, 5.18.

Сравнение фактического и ожидаемого распределения сейсмичности в шахте Lucky Friday показано на рис. 5.19, где затемненной областью показана прогнозируемая зона выбросов, а штриховой линией – ориентация напластования. Из рисунка видно, что сейсмичность концентрируется в лежачей стене уступа, где нормальное скольжение идентифицируется наиболее часто.

Кроме этих специфических соображений, относящихся к конкретным условиям шахты Lucky Friday, при рассмотрении механизма внезапных выбросов пород следует учитывать общие особенности расположения выработок туннельного типа в кварцитах, показанные на рис. 5.20.

Далее описаны примеры выбросов скольжения на шахте Lucky Friday.

Выброс пород в августе 1998 г. (рис. 5.21, 5.22) с магнитудой 3,1 случился в обеих стенах уступа 5750-05, из-за чего

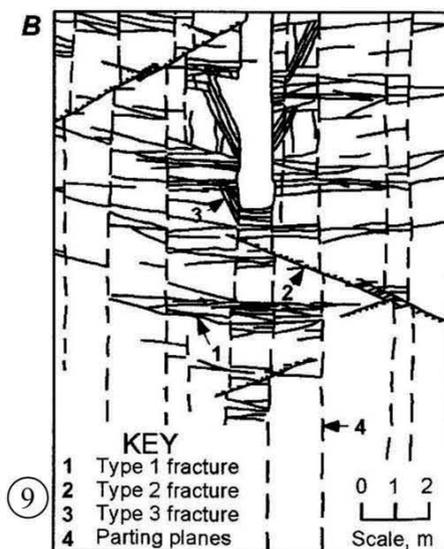
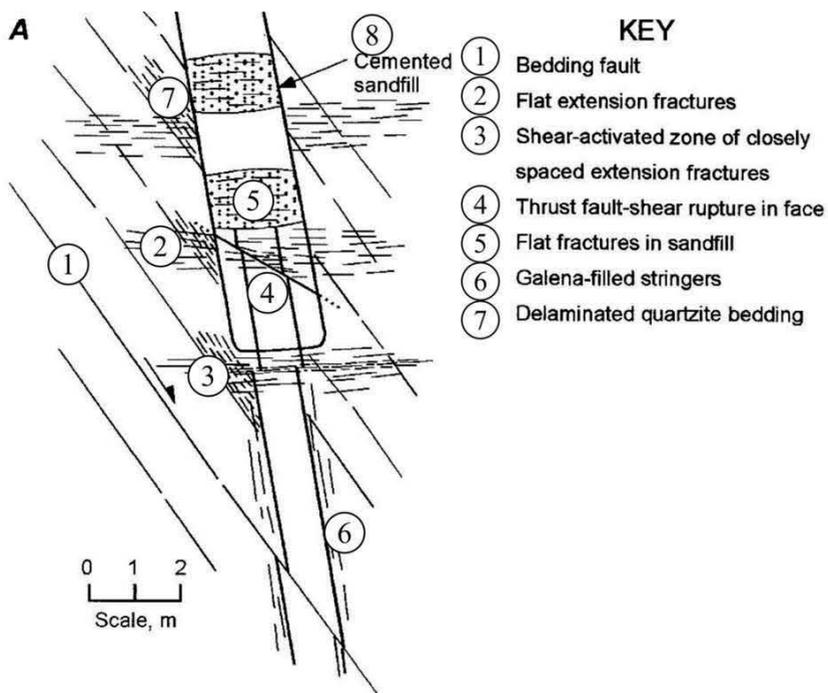


Рис. 5.17. Развитие трещиноватости в структурах месторождений Lucky Friday и Witwatersrand, вызванной горными работами

Объяснения к рис. 5.17:

А) сечение по жиле *Lucky Friday*.

В) структуры месторождения *Witwatersrand*.

1 – напластования в нарушении; 2 – плоское распространение трещин; 3 – срезающая зона интенсивной трещиноватости; 4 – разрыв забоя сбросом; 5 – плоские трещины в закладке; 6 – пропластки, заполненные галенитом; 7 – расслоение кварцита; 8 – цементированная закладка; 9 – виды трещин, разделяющих плоскости.

цементированная закладка выработанного пространства разрушилась на среднюю глубину 1 м на расстоянии около 25 м вдоль длины уступа. Как обычно, событие возникло во время продуктивных взрывных работ. Скольжение на 2-13 см по плоскостям напластования, происшедшее во время события было зафиксировано поперечными метками во вскрывающей выработке, однако многие метки были разрушены, из-за чего свидетельства скольжения не были документированы.

Плоскость скольжения продолжалась к уступу 5840-06, который располагался глубже уступа 5750-05. Уступ 5840-06 из-за выброса был временно остановлен и оставался недоступным, тогда как в уступе 5850-05 работы не прерывались. Основываясь на этих наблюдениях, минимальные размеры зоны скольжения оценивались длиной 90 м по простиранию и глубиной 30 м по падению.

Несколькими месяцами ранее покрашенные метки поперек напластования возле уступа 5840-06 постепенно смещались на расстояние до 18 см в течение 6 недель, необходимых для формирования уступа. Плоскость скольжения была видна во вскрывающем квершлага в 4 м от рудного тела, далее эта плоскость пересекла рудное тело и сместила его на расстояние 25 см, хотя это смещение не вызывало сейсмичности.

Высокий горизонтальный компонент напряжений массива может быть достаточен, чтобы вызвать расширение трещин и скольжения по ним пород без участия плоскостей напластования. Однако эти плоскости могут способствовать

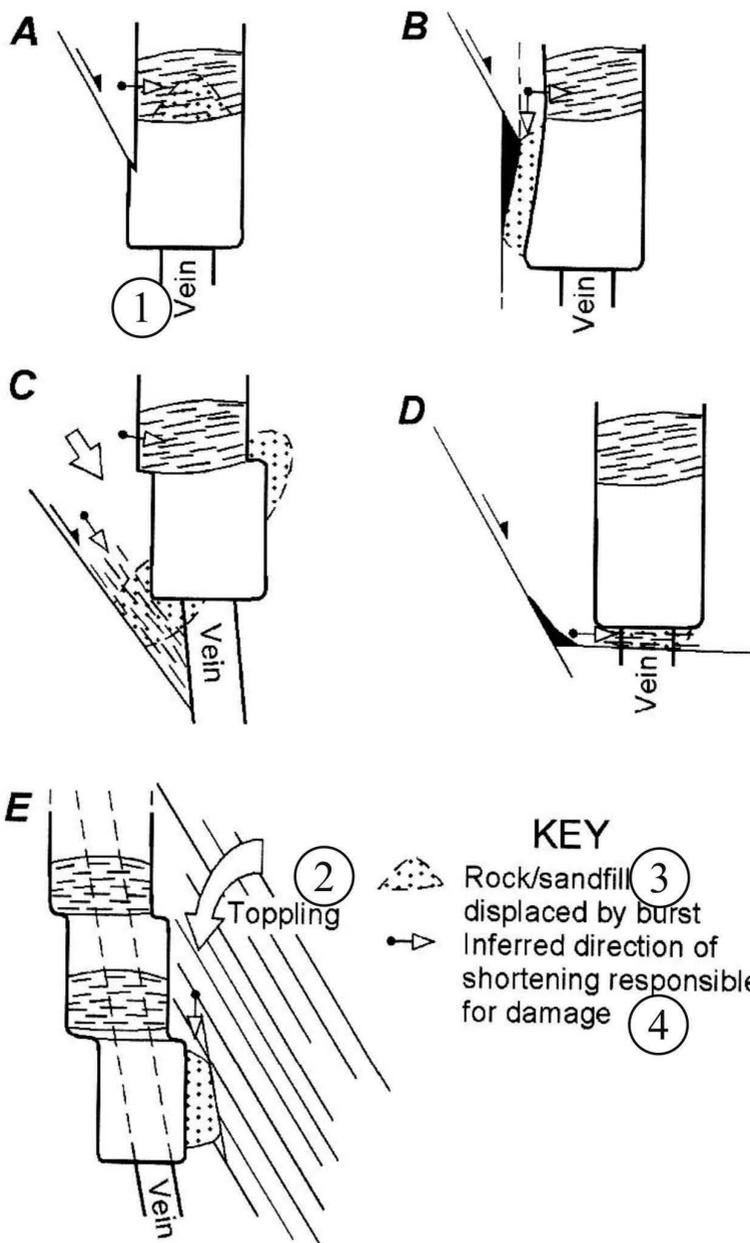


Рис. 5.18. Механизм внезапных выбросов пород, вызванных сдвижением пород в уступах

Объяснения к рис. 5.17:

А) повреждения песчаной закладки, вызванные скольжением в плоскостях напластования, пересекающих лежащий бок.

В) разрушения в лежащем боку в результате скольжения в плоскостях напластования.

С) повреждения в лежащем боку и почве уступа.

Д) повреждения в почве уступа, вызванные скольжением по трещинам, индуцированным горными работами.

Е) повреждения в висячем боку, вызванные высокими напряжениями и опрокидывания наклонных слоев.

1 – рудное тело; 2 – опрокидывание; 3 – порода/закладка, перемещенные выбросом; 4 – направление усилий, вызывающих повреждения.

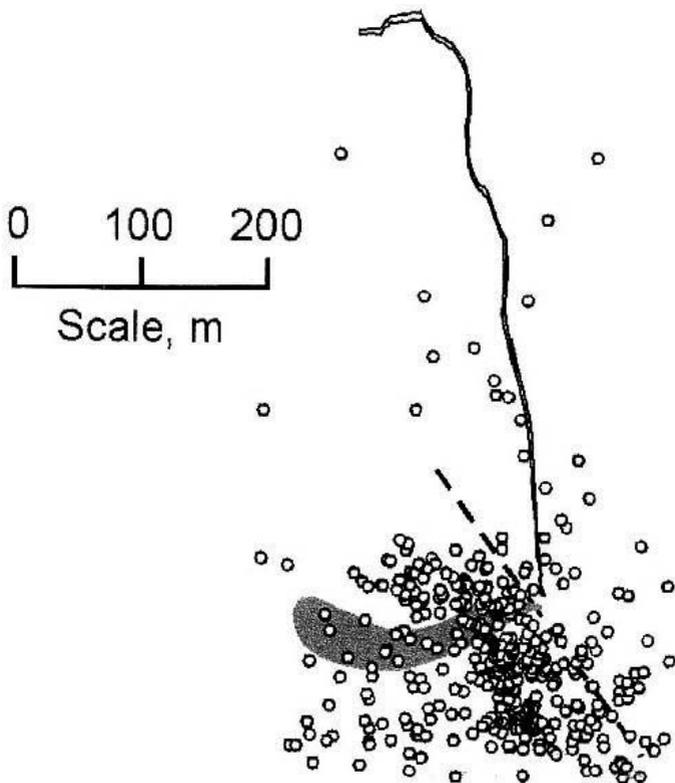


Рис. 5.19. Сравнение фактического и ожидаемого распределения сейсмичности в шахте Lucky Friday

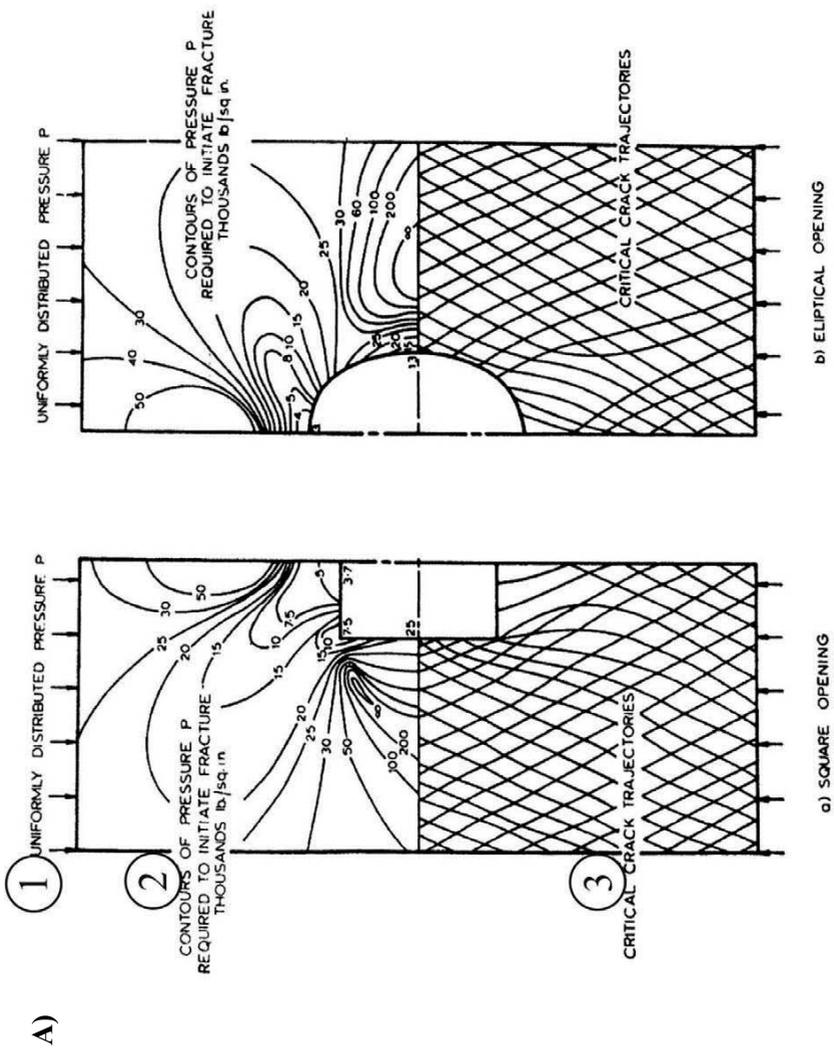
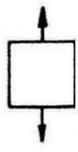


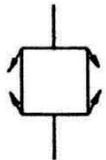
Рис. 5.20 Особенности расположения выработок туннельного типа в кварцитах

B)

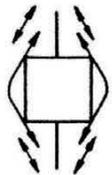
①



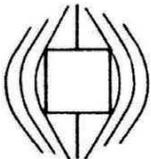
a) Formation of vertical roof and floor cracks at $P > 3700$ lb/sq.in.



b) Sidewall failure originating in square corners at $P > 7500$ lb/sq. in.

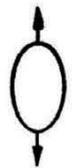


c) Stress redistribution due to roof and floor and sidewall fractures may induce extension of existing cracks and also initiate fracture remote from original opening boundary



d) Possible final fracture configuration

②



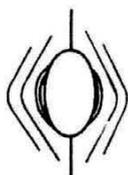
a) Formation of vertical roof and floor cracks at $P > 3000$ lb/sq.in.



b) Sidewall fracture in the form of "scaling" occurs at $P > 13000$ lb/sq. in.



c) Stress redistribution due to roof and floor and sidewall fractures may induce further sidewall scaling and also initiate fracture remote from original opening boundary



d) Possible final fracture configuration

Рис. 5.20 Особенности расположения выработок туннельного типа в кварцитах

Объяснения к рис. 5.20:

А) контур трещиноватости и траектории критических трещин в кварците, окружающем туннели с квадратным а) и эллиптическим, б) сечениями.

1 – осевое расщепление давления; 2 – контуры давления, требуемые для инициации трещин, тыс. фунтов/квадратный дюйм ($1 \text{ lb/sq.in}^2 = 1 \text{ pSi} = 6,895 \text{ кПа}$); 3 – траектории критических трещин.

Б) возможная последовательность трещинообразования для квадратного 1) и эллиптического 2) туннелей, строящихся в твердых кварцитах, подверженных вертикальному давлению P .

1. а) формирование вертикальных трещин в кровле и почве при $P > 3700 \text{ lb/sq.in}^2$; в) разрушение углов квадратного сечения при $P > 7500 \text{ lb/sq.in}^2$; с) перераспределение напряжений из-за трещин в кровле, почве и стенах может вызвать расширение существующих трещин и вызвать появление трещин, удаленных от начальных границ полости; d) возможная окончательная конфигурация трещин.

2. а) формирование вертикальных трещин в кровле и почве при $P > 3000 \text{ lb/sq.in}^2$; в) трещины в стенах в форме расслоения, происходящего при $P > 13000 \text{ lb/sq.in}^2$; с) как в квадратных туннелях; d) как в квадратных туннелях.

формированию трещин и таким образом принимать участие в выбросах в опорных целиках уступов.

Сравнение сейсмических явлений шахт Coeur d'Alene и Южной Африки показывает сходство их механизмов. В обоих случаях происходит закрытие (отсутствие доступа) уступа и последующее сокращение его размеров, вызванные внезапным выбросом пород. Увеличение напряжений способствует формированию трещиноватых зон. Вдоль них происходит скольжение пород, существуют и другие схожие черты обоих районов (рис. 5.23, 5.24).

Для уменьшения опасности внезапных выбросов, происходящих в результате скольжения пород по плоскостям напластования, применяются стратегические меры, связанные с изменением систем разработки, например, переход к разработке уступов в восходящем порядке, которая осуществляется горизонтальными слоями с помощью горизонтальных взрыв-

ных скважин. Метод характеризуется использованием опорных целиков для управления конвергенцией выработанного пространства или закладкой последнего. однако, если наличие целиков, с одной стороны, ограничивает скольжение массива, то с другой стороны может вызвать проблемы, связанные с

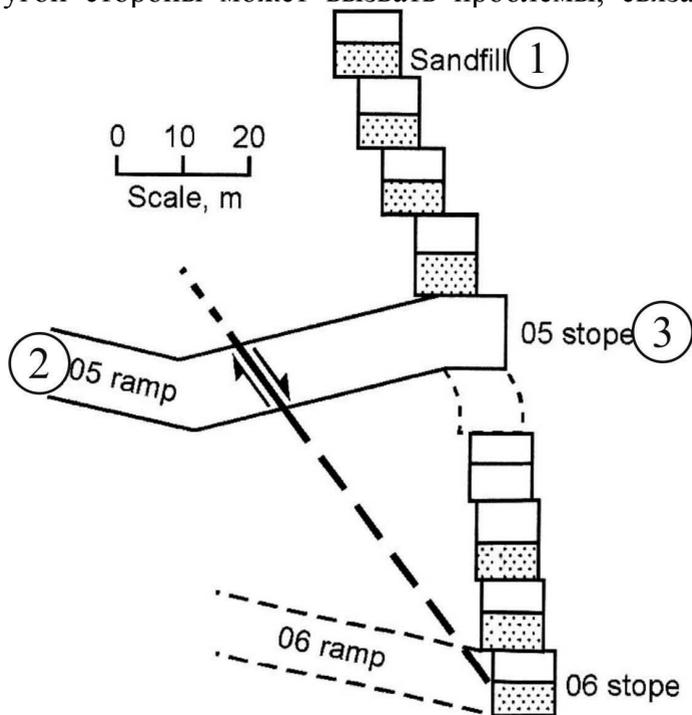


Рис. 5.21. Обстоятельства внезапного выброса пород 28 августа 1998 г. в уступе 5750-05

1 – песчаная закладка; 2 – рампа; 3 – уступ.

выбросами собственно в целиках. Применение закладки исключает этот недостаток, однако, из-за сжимаемости закладочного материала концентрация напряжений может сосредоточиться непосредственно в уступе. Для уменьшения сжимаемости в закладочный материал – песок или дробленая порода - добавляется цемент, прочность и быстрота схватывания которого могут быть улучшены микроцементной присад-

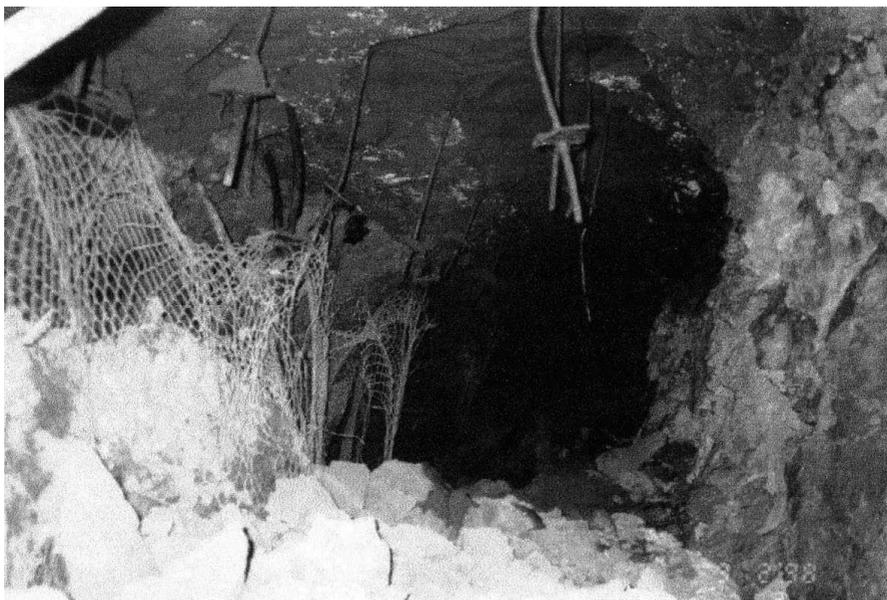


Рис. 5.22. Выброс в уступе 5750-05

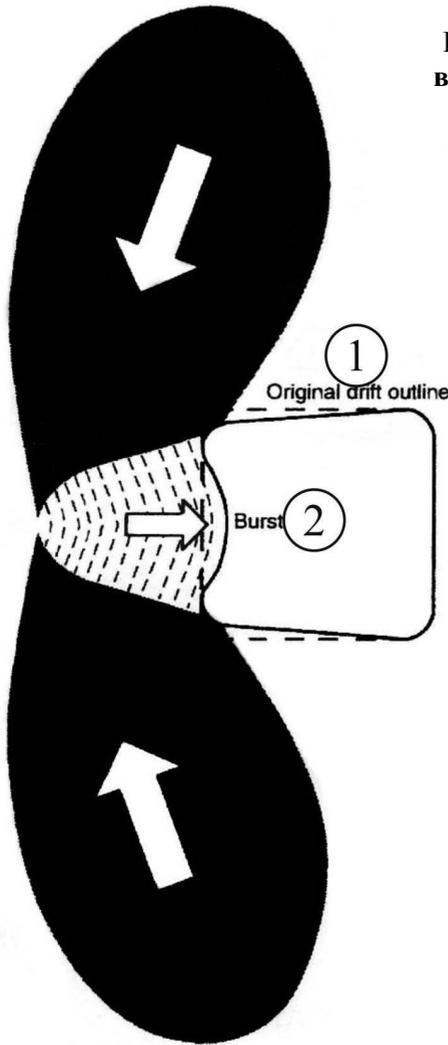
кой. Комбинация сжимаемой закладки и разгрузки опорных целиков часто оказывается приемлемым компромиссом.

Суммируя наблюдения процессов сейсмичности и внезапных выбросов пород в районе Соеиг d'Alene, можно отметить, что:

- большинство явлений сейсмичности – нормальная и сравнительно безопасная реакция горного массива на добывающую деятельность. Только меньшинство сейсмических событий содержит опасность внезапных выбросов пород. Их число и интенсивность зависит от локальных условий породных масс и горных работ;

- индивидуальные выбросы (сейсмические события) непредсказуемы. Однако, изменения в уровне сейсмичности, вызванные горными работами, могут позволить определить тенденции формирования выбросоопасности в конкретных подземных условиях;

Рис. 5.23. Механизм разрушения, вызванного напряженным выбросом. Зачерненные зоны показывают источник упругой энергии
1 – начальный контур штрека;
2 – выброс.



- в районе происходит три вида выбросов – напряженные, в целиках и скользящие. Каждый из них представляет собой уникальную опасность и должен быть рассмотрен отдельно с оценкой уровня возможности возникновения выброса и разработкой защитных мер.

Главной причиной высокой сейсмической активности и выбросоопасности пород в условиях района Coeur d'Alene яв-

а)



б)



Рис. 5.24. Последствия внезапного выброса в штреке
а) общий вид; б) повреждения в кровле.

ляется крутое падение плоскостей напластования и тектонических нарушений. Предполагается, что эти ослабленные зоны причиняют разрушения при значительно меньших напряжениях, чем потребовались бы при пологом залегании массива и в условиях нерасслоенных пород.

5.2 Стратегические меры управления внезапными выбросами пород

Рудное тело шахты Lucky Friday до 1986 г. разрабатывалось традиционной потолкоуступной системой с оставлением опорных целиков и песчаной закладкой выработанного пространства (рис. 5.25-5.27). Жила, залегающая крутонаклонно или вертикально, разделялась по падению на интервалы (горизонты) высотой 61 м транспортными выработками, проведенными по простиранию параллельно залежи, и наклонными квершлагами (рампами), вскрывающими под углом 15° горизонты с интервалами по простиранию 76 м. На каждом горизонте субгоризонтами с вертикальными интервалами 27 м вскрывалось 8 уступов. Субгоризонты соединялись по вертикали наклонными или вертикальными рудоспусками, вспомогательными (вентиляционными) скважинами большого диаметра и отрабатывались уступами длиной по простиранию около 76 м. В работе находились примерно 24 забоя, необходимых, чтобы обеспечить общую добычу 900 т/сут. при работе трех горизонтов. Из-за повреждений, вызванных внезапными выбросами, необходимости замены и ремонта деформированной крепи, а также выполнения закладочных работ только 50% уступов работали одновременно. Отбитая руда грузилась в рудоспуски и далее в вагонетки, которыми транспортировалась к скиповым подъемам стволов.

Одной из особенностей применявшейся потолкоуступной системы разработки являлось оставление опорных целиков, необходимых для поддержания высоты рабочего пространства забоев. При увеличении пролета выработанного простран-

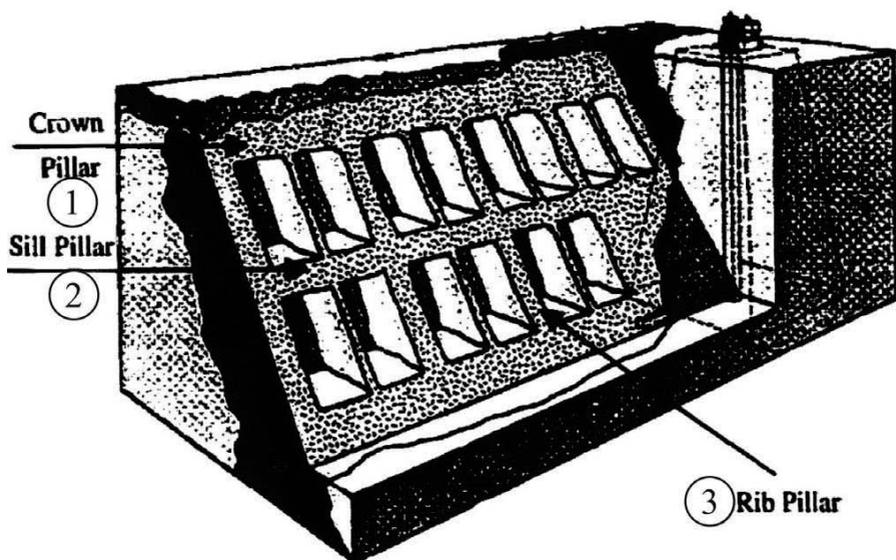


Рис. 5.25. Целики, оставляемые для поддержания кровли в шахтах с твердыми породами

1 – верхний целик; 2 – нижний целик; 3 – боковой целик.

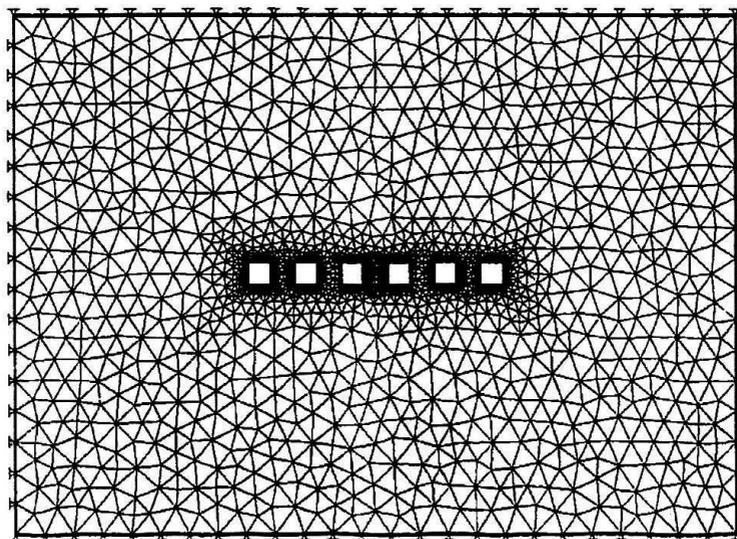


Рис. 5.26. Цифровая модель распределения напряжений вокруг целиков

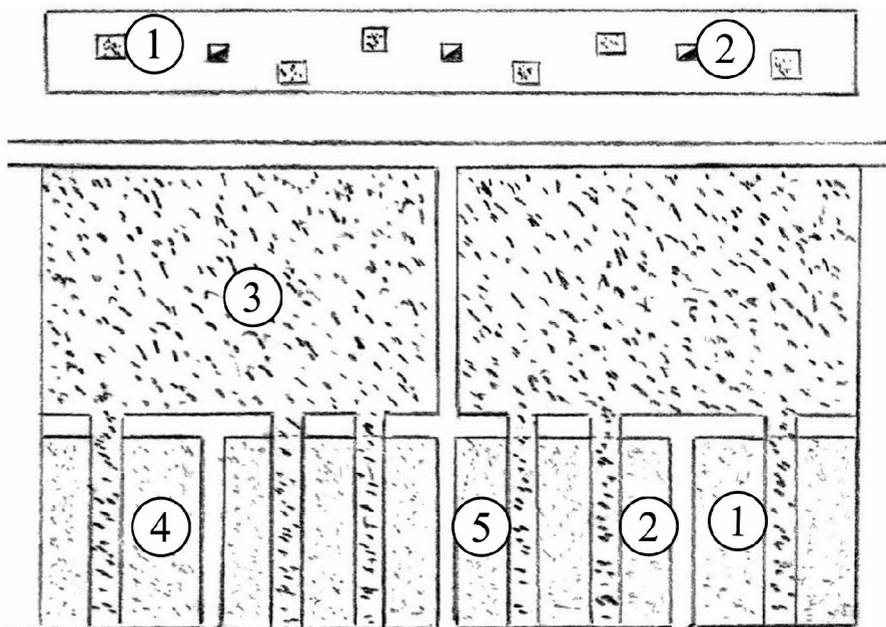


Рис. 5.27. Схема оставления целиков при потолкоуступной выемке крутопадающих рудных тел

1 – целик; 2 – рудопуск; 3 – руда; 4 – выработанное пространство с песчаной закладкой; 5 – вспомогательные и вентиляционные восстающие.

ства или сокращении размеров целиков, в них концентрируются напряжения, в результате которых целики разрушаются. Это разрушение может быть постепенным или внезапным в зависимости от относительной прочности целика и породных стен. Постепенное разрушение характеризуется образованием трещин и созданием податливости, тогда как внезапное разрушение – высвобождением сейсмической энергии. Когда количество этой энергии достаточно для повреждения подземной полости, разрушение целика становится выбросом пород.

Управление поведением пород, включая необходимость предотвращения или уменьшения магнитуды выброса – наибольший фактор, влияющий на метод добычи, безопасность и

стоимость работ на шахте Lucky Friday. Аргиллитовые прослойки почти параллельные рудному телу после обнажения в результате горных работ высыхают и теряют связи после каждого взрывания, вызывая неустойчивость выработанного пространства. Тяжелая свинцовая руда, весьма хрупкая и склонная к расслоению при ее извлечении, требует установки крепи (стоек или болтов) вслед за подвиганием забоя. Эти факторы делают горные работы уязвимыми к крупномасштабным непредсказуемым выбросам пород.

Как уже говорилось, в результате падения цен на металл шахта Lucky Friday была закрыта, а после 1986 г. снова открыта с применением варианта потолкоуступной системы разработки без оставления целиков. В новом варианте длина уступов была увеличена с 76 до 275 м, что позволило уменьшить объем строительства вскрывающих наклонных квершлагов – рамп.

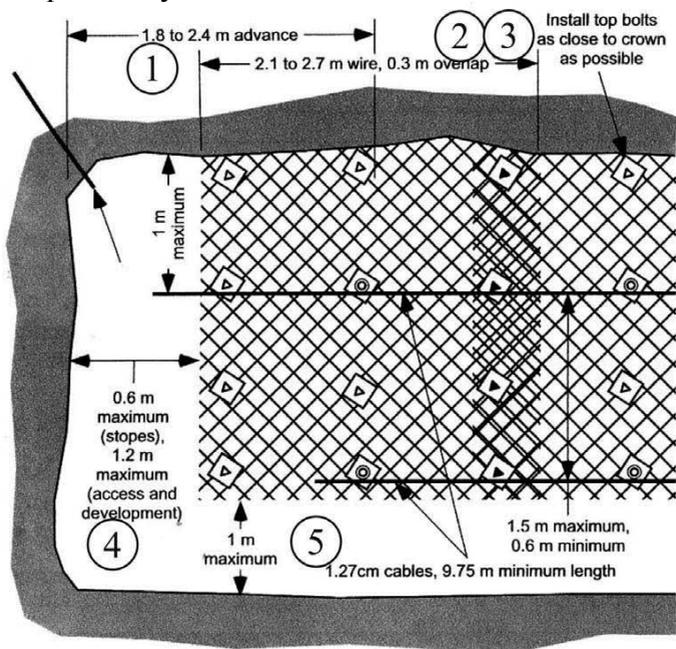
Кроме изменения системы разработки в качестве стратегического противовыбросного решения была также применена гидравлическая закладка выработанного пространства с повышенной прочностью материала, которая обеспечивалась добавлением цемента к водо-песчаной пульпе. Закладка ограничивала открытые поверхности напряженных пород и позволила исключить необходимость оставления опорных целиков.

В результате компьютерного моделирования горных процессов была упрощена конфигурация добычных фронтов, что снизило скорость высвобождения энергии при выбросах. Была также изменена последовательность добычных операций.

5.3 Тактические меры управления внезапными выбросами пород

К тактическим мерам управления выбросами на шахте Lucky Friday относится адекватный выбор крепи и разгрузоч-

ное взрывание. Здесь типичная конфигурация крепи выработок состоит из комбинации продольно разрезанных (Split Set) и тампонируемых полимерами болтов с металлической сеткой (рис. 5.28). Набрызгбетон, усиленный металлическими стержнями, часто используется в зонах, где малые напряженные выбросы происходят во время бурения скважин для взрывных работ и установки болтов.



LEGEND

- 6 1.8 m split set bolt with 0.45 m split set to reinforce collar
- 7 1.22 m split set bolt
- 8 0.45 m split set inside a longer split set bolt

Рис. 5.28. Типичная конфигурация крепи выработок в выбросоопасных породах шахты Lucky Friday

1 – опережение; 2 – перекрытие; 3 – установка верхних болтов в кровле; 4 – максимальное отставание крепи; 5 – кабаты; 6 – болты Split Set длиной 1,8 м; 7 – болт Split Set длиной 1,2 м; 8 – короткий болт Split Set длиной 0,45 м внутри более длинного болта.

Применение на шахте разгрузочного взрывания началось с момента, когда стало понятно, что почти 75% выбросов происходит во время или часом позднее продуктивных взрывных работ, которые часто приурочены к концу смены, в особенности, в местах, где одновременно проводятся работы в нескольких забоях. Иногда продуктивное взрывание используется, как сотрясательное, чтобы скорее обострить, чем ограничить сейсмические удары в попытке спровоцировать внезапные выбросы, которые, в противном случае, могли бы произойти в рабочую смену.

В других случаях продуктивное взрывание комбинируется с разгрузочным. Тогда скважины взрывного цикла выбрасывают отбитую руду, позволяя продолжать основную функцию подвигания забоя, одновременно сотрясая его, провоцируя тем самым возникновение выброса до начала рабочей смены. Если выброс действительно происходит, вызванные им повреждения редко контролируются, но часто весьма обширны, хотя и безопасны для шахтеров, эвакуируемых на время взрывных работ.

Комбинированное с продуктивным разгрузочное взрывание, предназначенное образовывать трещины в высоко напряженной части породного массива, заключается в бурении и взрывании дополнительных скважин таким образом, чтобы породы были раздроблены взрывом, но не отбиты (см. главу 3). Деформация, происходящая, как часть разрушения, вызывает переход напряжений от разгруженных пород к отдаленному массиву, способному выдержать эти напряжения более безопасно.

Разгрузочное взрывание на шахте Lucky Friday доказало свою эффективность для уменьшения опасности напряженных выбросов, но оно часто проблематично для предотвращения выбросов в целиках. Такой целик разрушается бурением и взрыванием единственного ряда скважин вдоль рудного тела. Этот способ разгрузочного взрывания с 1960-х гг. быстро стал принципиальной тактикой управления выбросами в

целиках. При высоте целиков до 15 м диаметр скважин принимается обычно более 100 мм, а интервал их расположения – 3 м и меньше.

Существуют, однако, некоторые недостатки разгрузочного взрывания целика. Во-первых для его проведения требуются эксперименты по выбору дизайна взрывания, во-вторых существуют производственные проблемы, связанные с потерей добычи из-за затрат времени и труда на проведение разгрузочных работ. По причине таких соображений существует тенденция откладывать разгрузку целика до тех пор, пока отработка не уменьшает его до размера, когда напряжения достигают опасного уровня. Это может вызвать выброс во время бурения разгрузочных скважин, что на шахте Lucky Friday однажды уже привело к смертельному случаю. Наконец, трудно оценить была ли массовыми разгрузочными взрывами полностью устранена возможность внезапного выброса. Травмы, включая смертельные, случались как результат выбросов в предположительно разгруженном целике. Более того, неудачное разгрузочное взрывание может на самом деле даже увеличить уровень опасности.

Далее приводится описание решений по разгрузочному взрыванию в шахте Galena, в районе Coeur d'Alene.

На рис. 5.29 показан карта основных нарушений в шахтном поле. Породный массив состоит из кварцитов и, в меньшей степени, - аргиллитов. Большинство разрывов в нарушениях минерализованы. На рис. 5.30 изображены разветвления рудного тела, по которым пройдены штреки 46-99 горизонта 4300. Плоскость нарушений, пересекающая рудное тело под углом около 90° , имеет размеры 1,6 x 0,4 км. На почти 70% площади уступов, где за 20 месяцев наблюдений произошли 29 наибольших сейсмических событий с магнитудой 1,8-2,9, они были связаны с плоскостью нарушения. Другие события в течение этого периода происходили на другой структурной особенности с размерами 0,3 x 0,8 км.

Испытания разгрузочного взрывания проводились в 1989-90-х гг., однако, они не вызывали сейсмических событий с магнитудой более 0,7, совпадавших с тремя попытками разгрузки. На рис. 5.31 показан один из этапов этих работ в уступе 46-99. Бурились 8 скважин длиной по 10 м и 3 скважины длиной 4 м. Общее количество взрывчатки во всех скважинах составило 125 кг. Уступ разрабатывался между горизонтами 4300 и 4600 на глубине 1,5 км от поверхности земли с оставлением погоризонтного барьерного целика высотой 21 м. При разработке уступ показывал довольно высокое число и темп возникновения микросейсмических событий.

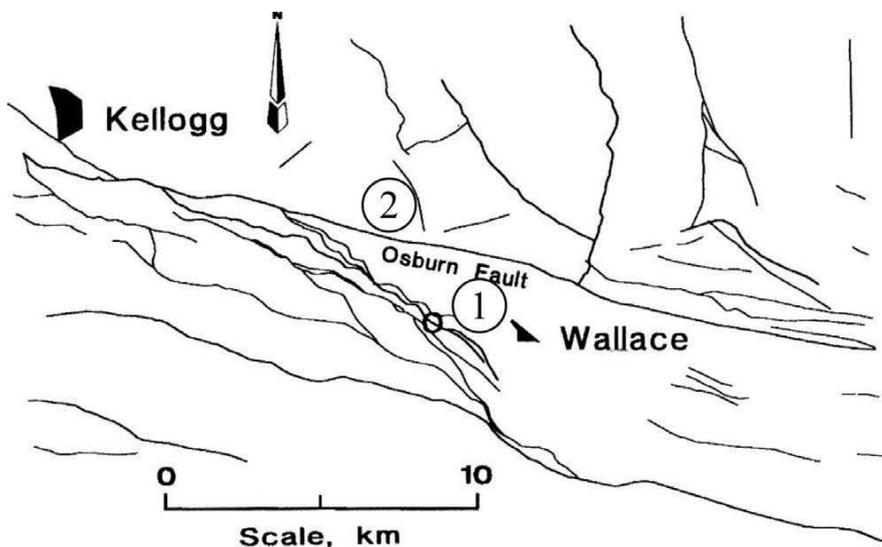


Рис. 5.29. Карта расположения основных нарушений в районе шахты Galena
 1 – шахта Galena; 2 – нарушение Osburn.

Как уже говорилось, разгрузочное взрывание не вызвало больших выбросов, однако, при возобновлении продуктивных взрывов через 30 мин. после них значительный внезапный выброс пород произошел в рудоспуске, вызвав в нем серьезные повреждения (рис. 5.32). Через 3 недели после разгрузки

значительные события (с магнитудой более 0,7) в уступе 46-99 были зарегистрированы сейсмографами на поверхности.

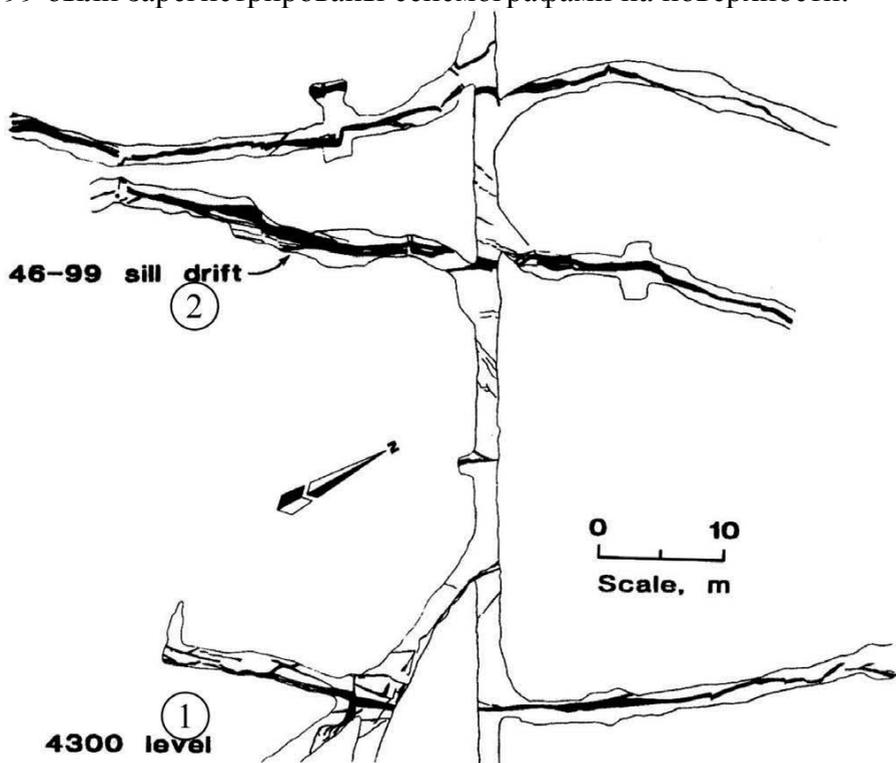


Рис. 5.30. Выработки горизонта шахты Galena, пройденные по разветвлениям жилы (показаны черным)
1 – гор. 4300; 2 – штрек.

Анализ результатов разгрузочного взрывания на шахте Galena привел к выводу, что он не может рассматриваться, как успешное.

На шахте Star в 1975-76-х гг. разгрузочное взрывание применялось на гор. 7700. Зона испытаний была разделена на два уступа общей длиной 79,2 м и высотой (по восстанию) – 24,4 м. В одном уступе площадью 39,6 м x 24,4 м разгрузочное взрывание выполнялось снаружи рудной жилы (рис. 5.33), тогда как в другом уступе – непосредственно по жиле

(рис. 5.34). Разгрузочные скважины бурились диаметром 92 и 102 мм, расход взрывчатого вещества составил примерно 1,2-2,2 кг/м² взрываемой площади в зависимости от размещения скважин. Лучшие результаты были показаны во втором варианте.

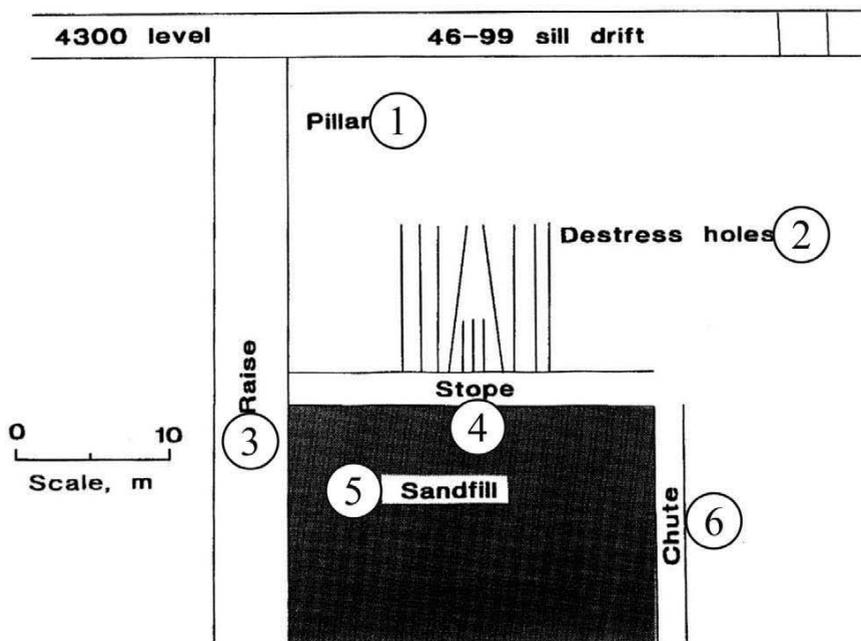


Рис. 5.31. Разгрузочное взрывание в уступе 46-99

1 – целик; 2 – разгрузочные скважины; 3 – вспомогательная восстающая; 4 – уступ; 5 – песчаная закладка; 6 – рудоспуск.

В ходе выемки зоны, обработанной таким образом, выбросы не появлялись, но возобновились после выхода из нее добычных забоев. На следующий год после этих испытаний в шахте Star произошло 15 выбросов, еще через год – 20. Поэтому в 1980 г. на гор. 7900 было решено повторить разгрузочные работы (рис. 5.35, 5.36). В 1981 г. добыча руды велась в обработанной зоне и не сопровождалась выбросами. Работы предполагалось продолжить, но в 1982 г. шахта была закрыта из-за низких цен на металлы.



Рис. 5.32. Повреждения в рудоспуске шахты Star

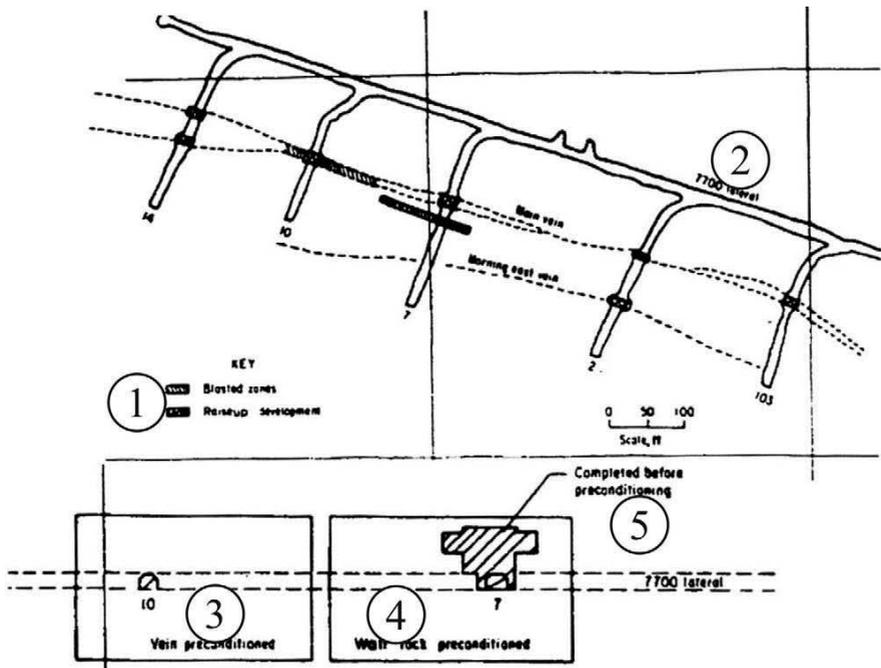


Рис. 5.33. Разгрузочное взрывание снаружи жилы на гор. 7700 шахты Star

1 – разгруженные зоны; 2 – горизонт 7700; 3 – разгруженная жила; 4 – разгруженная породная стена; 5 – работы, выполненные перед разгрузкой.

Одна из старейших технологий управления внезапными выбросами в районе Соег d'Alene – изменение скорости подвигания забоев. Последние могут быть вообще остановлены, когда наблюдается необычная сейсмическая активность, а после ее снижения работа в них возобновляется. Шахтеры второй смены часто не начинают работ, пока сейсмичность, повышенная из-за взрывания в первой смене, не снизится до приемлемого уровня. Задержка добычных работ дает возможность породному массиву неупруго деформироваться, что отодвигает напряжения от периметра экскавации. Более бы-

страя добыча увеличивает сейсмичность на 1 т добычи по сравнению с медленными темпами подвигания забоя.

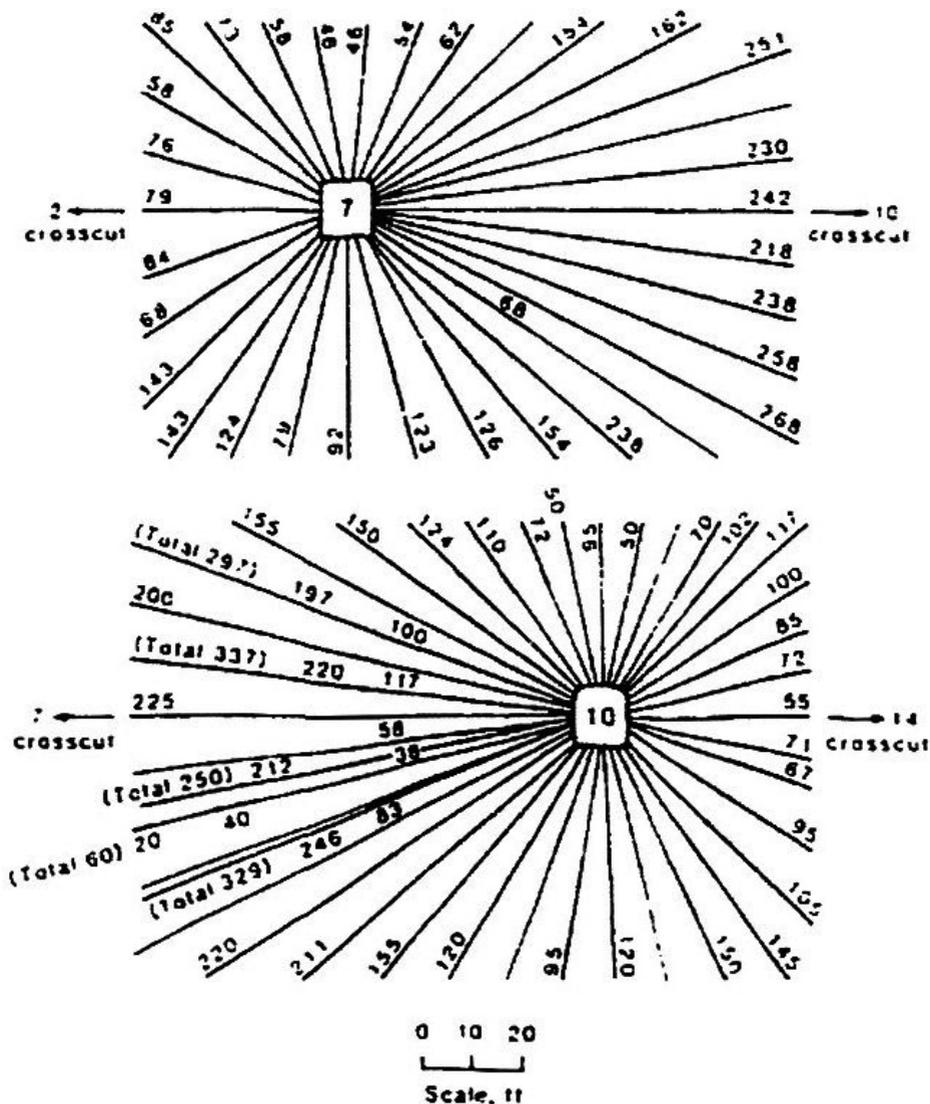


Рис. 5.34. Разгрузочное взрывание по жиле на гор. 7700 шахты Star

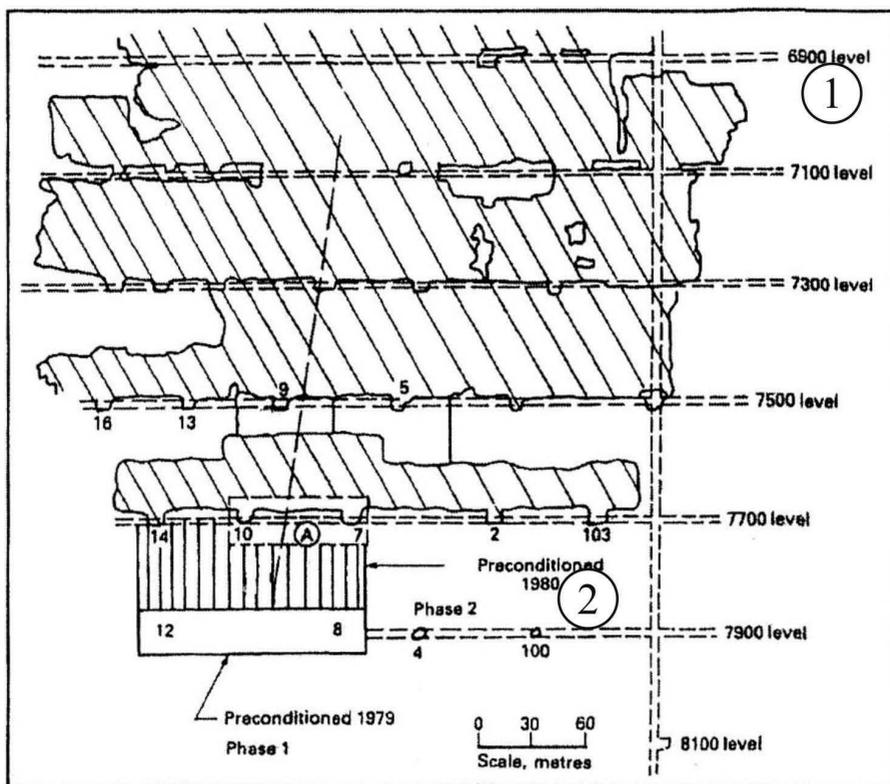


Рис. 5.35. План горных работ шахты Star с предварительной разгрузкой уступа, намеченного к работе
 1 – горизонт 6900; 2 – разгруженная в 1980 г. зона.

Важность фактора времени также очевидна из гистограммы распределения сейсмической активности (рис. 5.37) и смертельных случаев в ходе рабочей недели (табл. 5.2). Воздействие периода времени на сейсмичность понятно недостаточно, а причины преобладания смертельных случаев в среду и снижения в пятницу неочевидны.

Далее приведены описание и анализ механизма внезапных выбросов пород, происходивших на шахте Lucky Friday в выработках туннельного типа: транспортного горизонтально-

го квершлага гор. 6020 и участковых наклонных rampах гор. 5300.

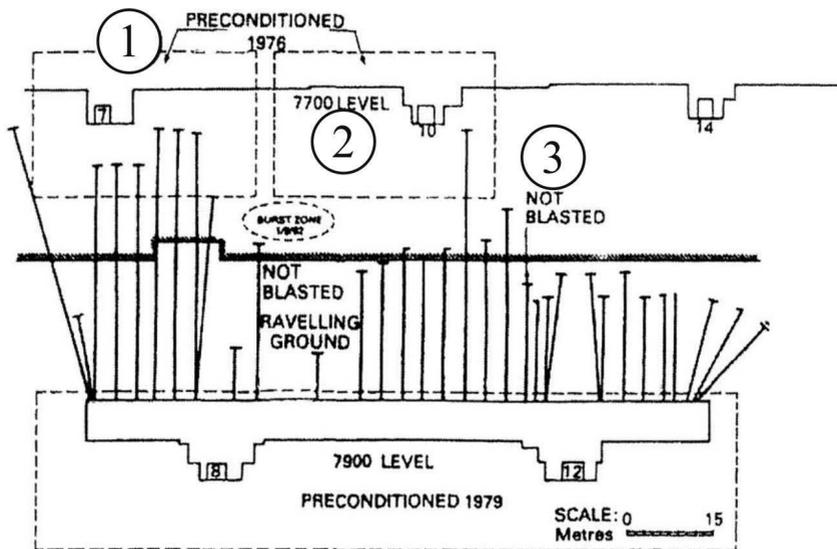


Рис. 5.36. Расположение скважин предварительной разгрузки уступа шахты Star

*1 – предварительно разгруженная зона; 2 – горизонт 7700;
3 – невзрываемая трещиноватая зона.*

Таблица 5.2 – Смертельные случаи от внезапных выбросов в дни недели

Шахты	Рабочие дни недели				
	понедельник	вторник	среда	четверг	пятница
Lucky Friday	-	1	3	-	1
Sunshine	-	-	3	1	1
Galena	-	2	1	1	4
Star/Morning	-	-	4	-	-
Всего	-	3	11	2	6

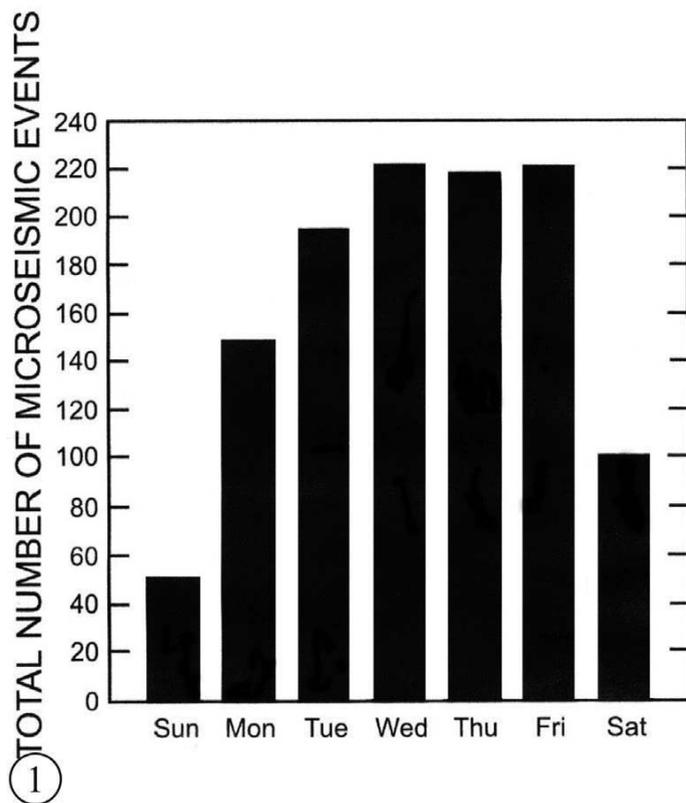


Рис. 5.37. Гистограмма распределения сейсмической активности по рабочим дням недели

1 – общее число микросейсмических событий.

5.4 Основные сведения о сейсмических событиях в выработках туннельного типа

5.4.1 Транспортный горизонтальный квершлаг гор. 6020

При строительстве транспортного квершлага гор. 6020 была встречена большая выбросоопасность пород (рис. 5.38). Минимальная крепь, применявшаяся в квершлагае, включала металлическую сетку 5 см x 5 см, прикрепляемую к породам кровли анкерными болтами Split Set длиной 1,8 м с расстоя-

нием между ними 0,9 м. Стены крепились такими же болтами длиной 1,2 м с интервалами 1,2 м и сеткой. На сетку наносился слой набрызгбетона толщиной 50 мм, армированного металлическими стержнями.

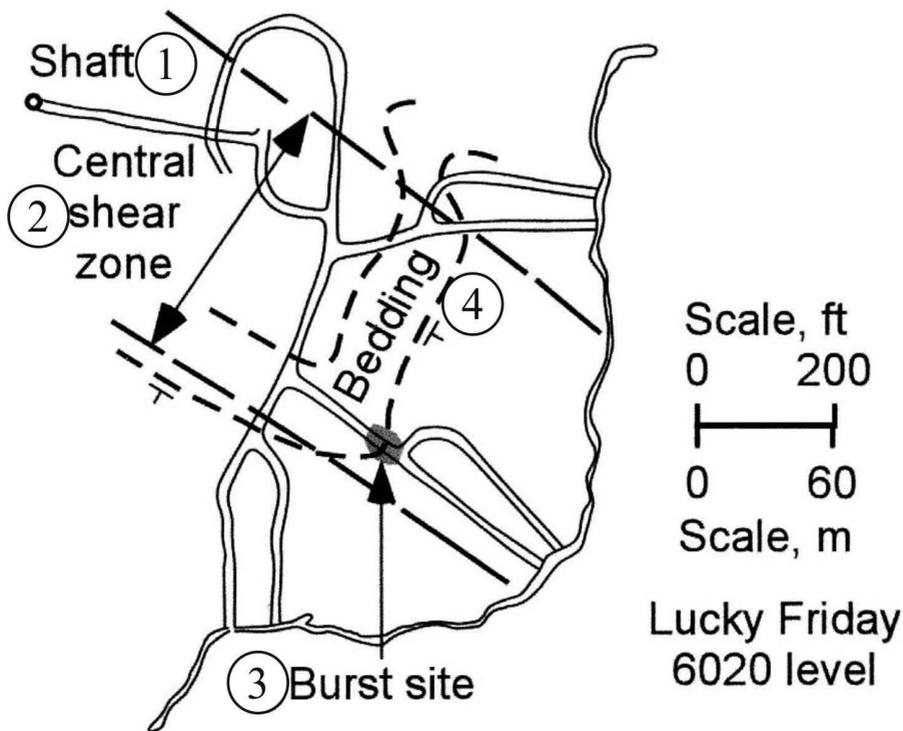


Рис. 5.38. План горных работ гор. 6020 шахты Lucky Friday
1 – ствол; 2 – центральная срезанная зона; 3 – горизонтальный туннель (квершлаг) с местом внезапного выброса; 4 – напластования.

Квершлаг пересекал слюдястые кварциты (рис. 5.39), которые иногда расслаивались вдоль напластования пород на тонкие слои, образовавшиеся, очевидно, из-за высоких напряжений.

На гор. 6020 транспортный квершлаг проходил в плоскости оси выпуклой геологической структуры – антиклинали,

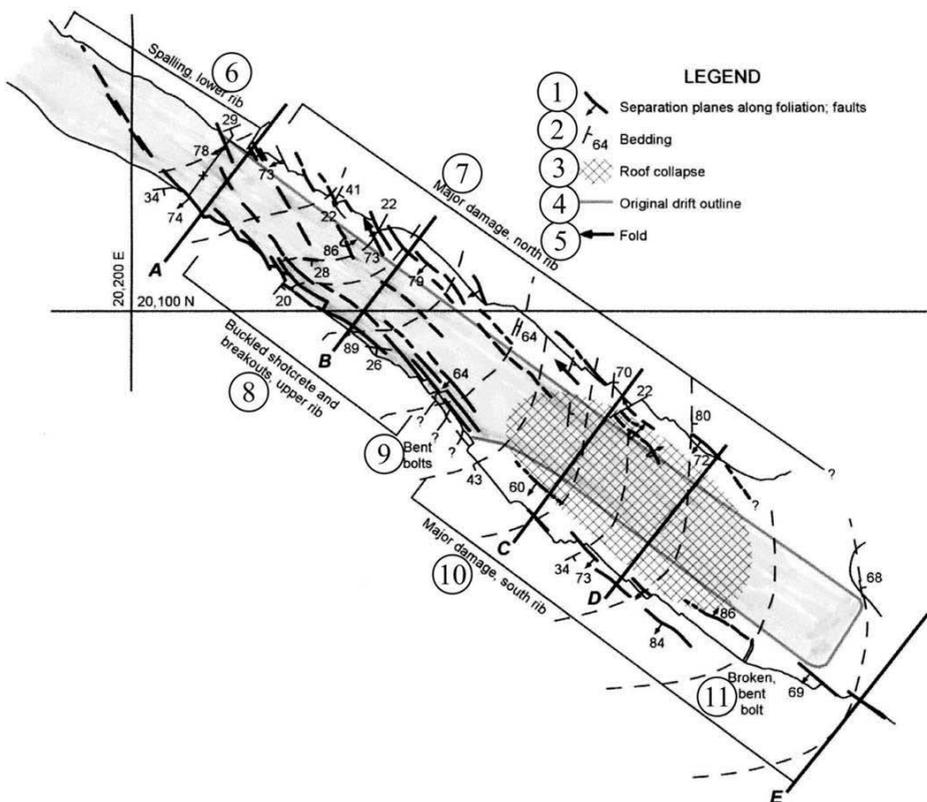


Рис. 5.39. Карта места выброса в транспортном квершлага гор. 6020

1 – разделяющие плоскости вдоль складчатости нарушения; 2 – напластования; 3 – обрушение кровли; 4 – начальный контур туннеля; 5 – складка; 6 – расслоение; 7 – главные повреждения в северном боку; 8 – прогнутый и разрушенный железобетон; 9 – согнутые болты; 10 – главные повреждения в южном боку; 11 – разрушенные согнутые болты.

которая погружается в глубину под углом 30^0 и поэтому квершлаг располагался в условиях малого угла пересечения напластования. Выбросоопасный участок находился между двумя крупными нарушениями в центральной срезанной зоне, отличающейся разветвленной сетью малых нарушений, за-

полненных и не заполненных глинами. Встречались также плоскости ослабленности, где породы были расщеплены на слои параллельные напластованию.

Ориентация максимальных напряжений в напластованиях кварцита во всех шахтах района близка к горизонтальной с тенденцией северо-западного направления, а их величина примерно в 2 раза превышает уровень минимальных напряжений.

При внезапном выбросе пород 27 декабря 2000 г. в квершлаг было выброшено примерно 320 т разрушенных пород с обеих стен, примерно вдвое увеличив ширину выработки. Часть породы выпала также из кровли (рис. 5.40). После удаления разрушенных пород обнажилась обширная полость на каждой стороне сечения квершлага. Серия поперечных сечений (от А до Е) показывает повреждения, нанесенные выбросом. Около половины болтов, вовлеченных в выброс были согнуты, как результат среза породных слоев.

Геологические структуры, видимые в стенах квершлага были разделены на плоскости, параллельные центральной срезанной зоне и образовавшие слои толщиной 5-20 см. Полости выброса сформировались этими плоскостями, а также системами трещиноватости, вызванными горными работами.

Все повреждения крепи, включая отслоение и прогиб набрызгбетона, ограничивались участком длиной 7-8 м.

Наблюдение картины выброса и теоретические обоснования позволили сделать вывод о том, что повреждения обеих стен квершлага сопровождалось перемещением пород к его центральной части (рис. 5.41), что объясняется прогибом и разделением породных слоев. Это же подтверждается и совпадением наиболее интенсивных повреждений в стенах квершлага с местами обрушения пород из его кровли.

Из-за наклона простираения пород к оси квершлага образовавшаяся при выбросе полость имела коническую форму.

Возникновение выброса объясняется высокими напряжениями, вызванными расположением квершлага. При выбран-

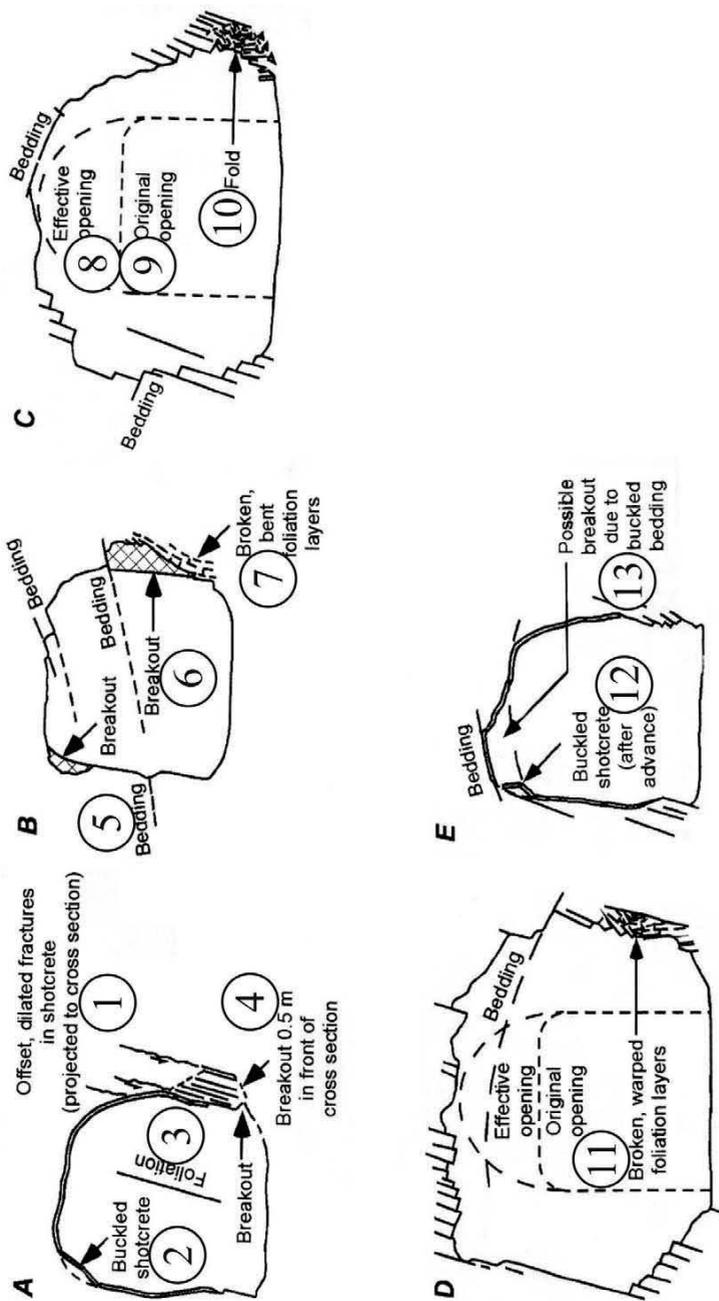


Рис. 5.40. Поперечные сечения в зоне выброса

1 – боковые расширенные трещины в набрызгбетоне; 2 – прогнутый набрызгбетон; 3 – расщепление; 4 – разрушения перед сечением; 5 – напластования; 6 – разрушения; 7 – разрушенные, изогнутые, пощепленные слои; 8 – фактическое сечение; 9 – начальное сечение; 10 – складки; 11 – разрушенные, покоробленные слои расщепления; 12 – прогнутый набрызгбетон (после подвигания); 13 – возможное разрушение из-за прогиба напластования.

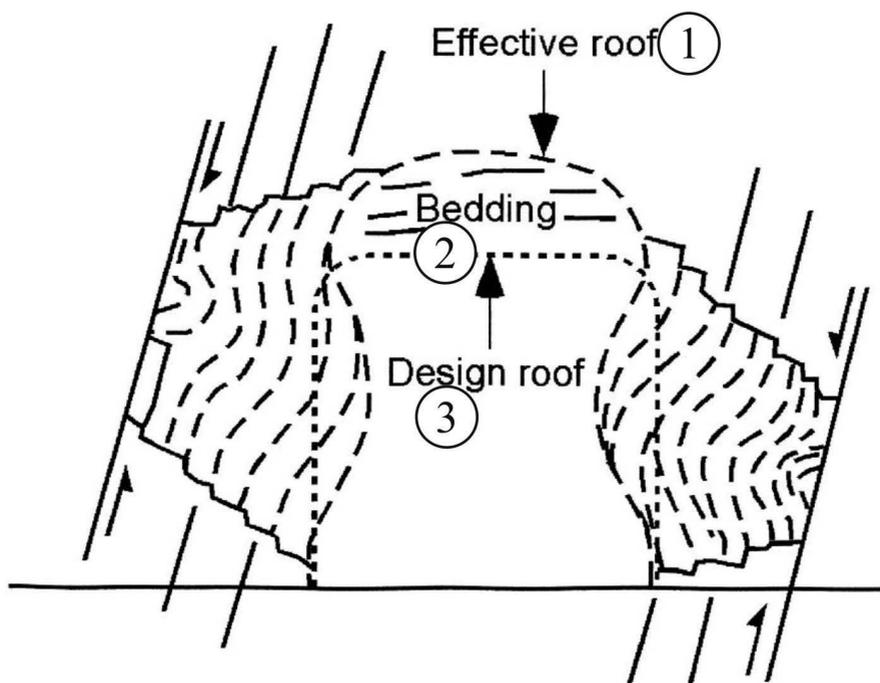


Рис. 5.41. Схема деформации пород в сечении квершлага гор. 6020

1 – фактическая кровля; 2 – напластования; 3 – кровля по первоначальному дизайну.

ной на шахте схеме вскрытия месторождения квершлаг каждого последующего горизонта проходятся в зоне высоких напряжений над неотработанным массивом рудного тела, вскрывая его со стороны висячего бока пород. Если бы эти квершлагы проходились со стороны лежачего бока, они бы располагались под выработанным пространством предыдущего горизонта в зоне разгруженных напряжений. С другой стороны, при вскрытии гор. 6020 несколько севернее, где угол падения напластования пород увеличивался, квершлаг, встречая их под менее острым углом, оставался бы более устойчивым.

Проведенные при исследовании обстоятельств выброса расчеты показали, что энергия, необходимая для создания затронутой им зоны с размерами (8 м – 23 м) х (9,3 м – 18,6 м) превышает фактическую в 25-50 раз. Следовательно, состоявшийся выброс не мог быть создан только энергией напряжений, содержащейся в выброшенной породе. Вероятно, дополнительная энергия, как упругая, так и потенциальная гравитационная, была высвобождена скольжением массива по срезанным плоскостям, ограничивающим участвующие в выбросе породы. Замечено, что скольжение пород вдоль нарушений обычно создает события с магнитудой 2,5 или больше, тогда как «чистая» энергия напряжений редко является причиной выбросов с магнитудой более 1,0.

5.4.2 Участковые наклонные ramпы гор. 5300

На рис. 5.42 показана ориентация главных максимальных горизонтальных напряжений на гор. 5300.

Системы мониторинга, работающие в шахте с 1973 г. показали, что сейсмические события, происходящие в ramпах, вскрывающих участки горизонта, могут быть разделены на 3 группы:

- первая группа состоит из событий наибольшей магнитуды, расположенных в пределах 90 м от подвигающегося забоя ramпы;
- вторая группа включает события любой магнитуды, расположенные в пределах 30 м от подвигающегося забоя ramпы;
- третья группа включает события с зарегистрированными повреждениями.

Группа 1. Большие сейсмические события, в ходе которых реализуется сейсмическая энергия, вызванная горными работами, связаны со многими крупномасштабными авариями. Например, событие с магнитудой 5,2 привело к полному обрушению части шахтного поля Solvay, штат Wyoming,

США. Эти большие события определяются записями сейсмограммы со всплесками, превышающими 30 мм, что соответствует магнитуде примерно 5,0.

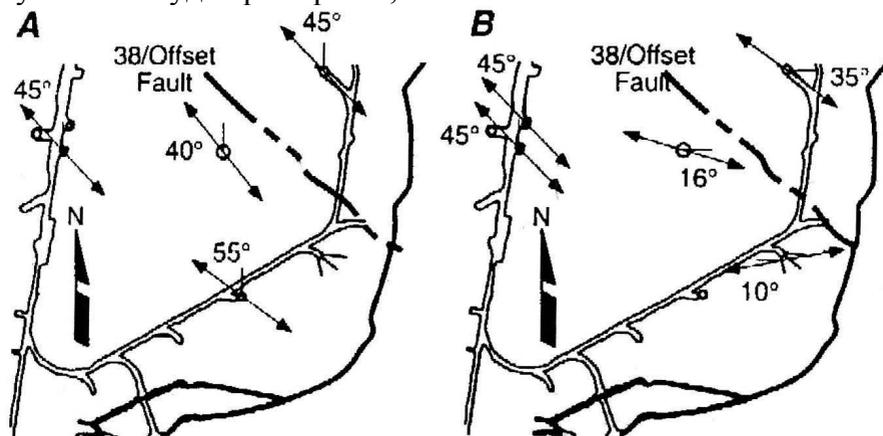


Рис. 5.42. Ориентация главных максимальных горизонтальных напряжений на гор. 5300 шахты Lucky Friday

A – ориентация в относительно слабых зонах; B – ориентация в относительно крепких зонах.

Группа 1 ограничивается событиями, происходящими в пределах 90 м (300 футов) от подвигающегося забоя. События, происходящие дальше, чем 90 м, не производят повреждений рампы и их происхождение не зависит от проходческих работ в забое (рис. 5.43).

К этой группе отнесены 29 больших сейсмических событий, в частности:

- события вертикального скольжения, к которым отнесены 6 событий, генерированных скольжением вертикальных трещиноватых зон в лежачем боку уступов 05 и 06. События происходили в период 45 дней после прохождения места выброса забоем;

- события вертикального скольжения, к которым отнесены 5 событий у южной границы центральной зоны между нарушениями Hook и Offset в период 60 дней, показавшие,

что осевая плоскость складки Hook Anticline принимает участие в генерировании сейсмических событий;

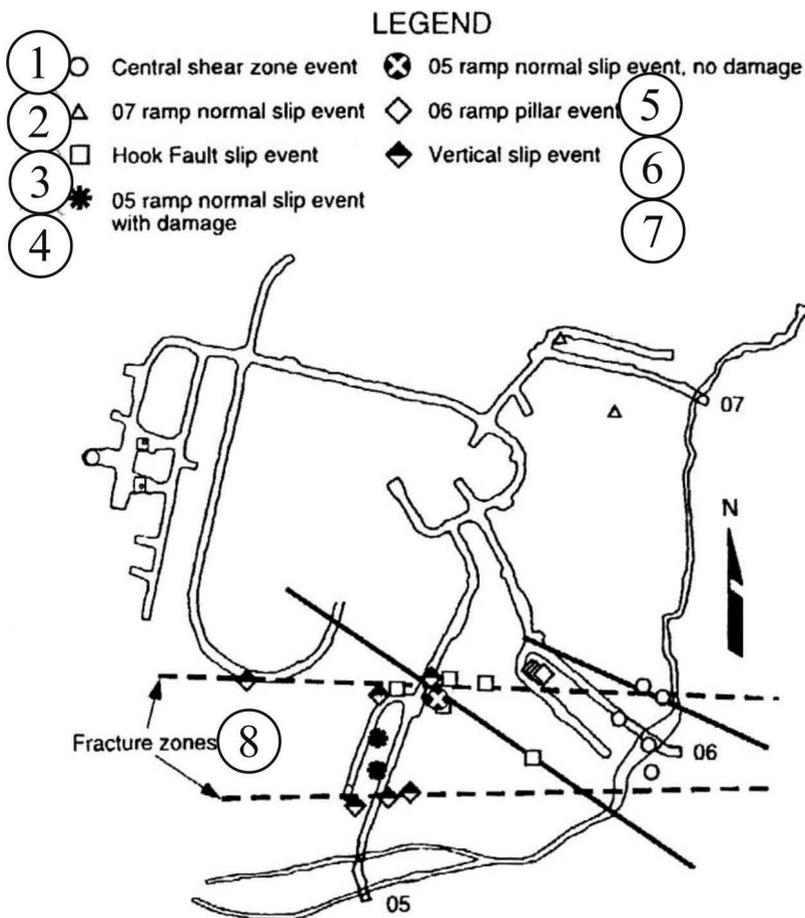


Рис. 5.43. Расположение больших сейсмических событий в различных зонах

1 – события в центральной срезанной зоне; 2 – события скольжения в рампе 07; 3 – событие скольжения нарушения Хук; 4 – событие скольжения в рампе 05 с повреждениями; 5 – событие нормального скольжения в рампе 05 без повреждений; 6 – событие в целике рампы 06; 7 – событие вертикального скольжения; 8 - трещиноватые зоны.

- события нормального скольжения, к которым отнесены 4 события в двух различных зонах рампы 05, происходившие при скольжении породных масс по плоскости напластования. Первые два события, повредившие рампу произошли между двумя вертикальными зонами среза. Еще два события, не вызвавшие повреждений, случились возле пересечения рампы с северной вертикальной зоной среза;

- события нормального скольжения в целике рампы 06. Первое из них повредило забой и потребовало удаления 100 т разрушенных пород. Еще три события произошли в течение следующих 5 месяцев и они сосредоточились в скоплении диаметром 6 м в окрестностях повреждений первого события, расположенного непосредственно над целиком. Близость событий к целику объясняется концентрацией локализованных напряжений. Повреждений, подобных вызванных первым событием, удалось избежать, поскольку после него в рампе была установлена крепь;

- события нормального скольжения рампы 07. Это группа из двух событий, которые произошли в течение 10 дней после прохода их мест забоем.

Отмечены также другие, менее серьезные события.

Анализ событий в рампах показал, что их спусковым механизмом служили экскавационные работы, изменившие поля напряжений.

Отношение между большими сейсмическими событиями и горными работами показано на рис. 5.44, 5.45.

Группа 2. Эта группа сформирована из большого числа неповреждающих сейсмических событий, проявившихся в ходе проходческих работ в рампах. События идентифицировались, если они происходили в пределах 30 м от подвигающегося забоя рампы. Выявленные сейсмографом, эти события обладали минимальной сейсмической энергией. Рис. 5.46 показывает две главные зоны сейсмических событий этой группы, вызванные проходческими работами.

Внезапные выбросы первых двух групп произошли в нескольких скоплениях (рис. 5.47).

Группа 3. Данные этой группы определялись событиями, повредившими забой рампы, стены или кровлю на горизонтах 5400 и 5480. Группа состоит из 20 событий, в которых были травмированы 4 шахтера и в целом потребовалось удаление 750 т породы в ходе восстановительных работ (от 10 до 100 т на выброс). Преобладающие повреждения произошли в стенах рампы (14 случаев), в кровле – в 3 случаях, забоя – в 2, почвы – в 1. Большинство этих событий вызвано высокими напряжениями массива, многие – прогибами породных плит в стенах или забоях рампы.

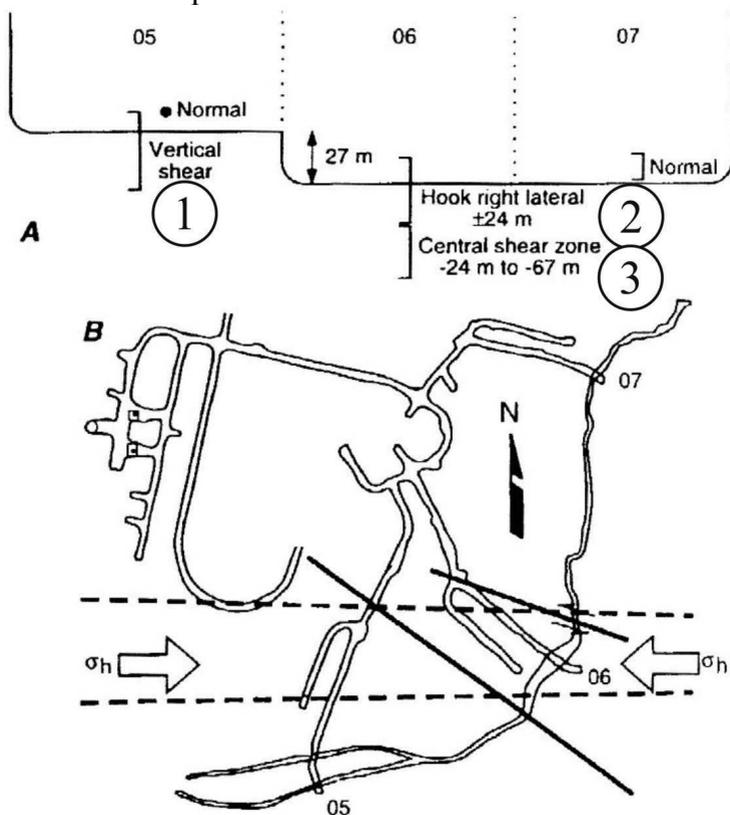


Рис. 5.44. Расположение главных групп больших сейсмических событий по отношению к разрабатываемому забою

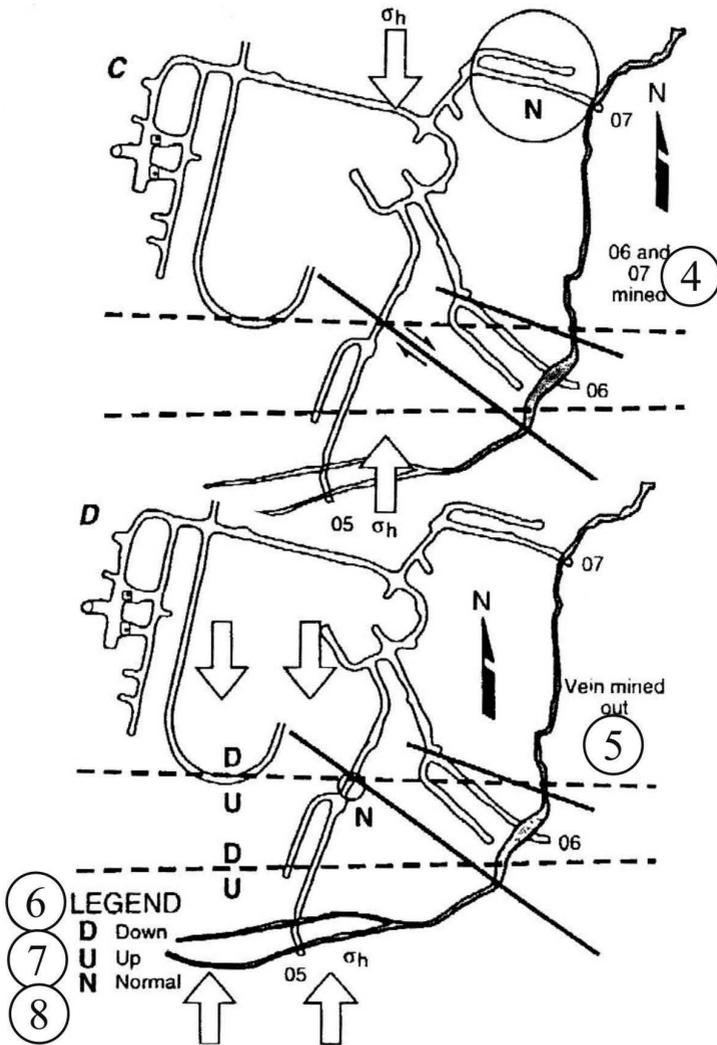


Рис. 5.44. Расположение главных групп больших сейсмических событий по отношению к разрабатываемому забою (окончание)

A – продольный разрез; B – план с направлениями напряжений; C – события, относящиеся к уступам 06 и 07; D – уменьшение напряжений при скольжении массива по плоскостям нарушений. 1 – вертикальный срез; 2 – боковое ответвление антиклинали Ноок; 3 – центральная срезанная зона; 4 – отработанные уступы 06 и 07; 5 – выработанное пространство; 6 – вниз; 7 – вверх; 8 – нормально.

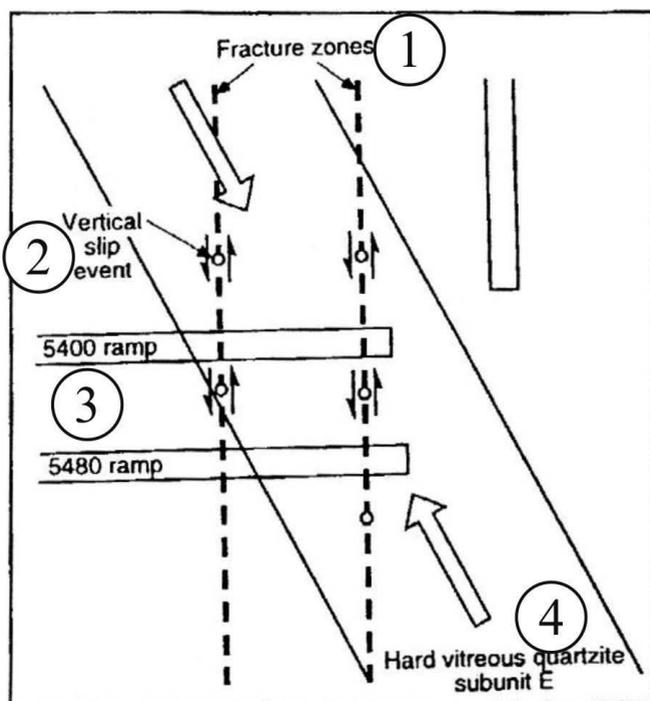


Рис. 5.45. Вертикальный разрез скольжения, стратиграфии и уступа

*1 – трещиноватая зона; 2 – событие вертикального скольжения;
3 – рампы; 4 – твердый кварцит.*

Характерным является механизм внезапного выброса в рампе 01, происшедшего в мае 1993 г. Выброс случился, когда два шахтера бурили скважины в стенах для болтов крепи и установки металлической сетки. Один из шахтеров заметил, что его сверло провалилось в стену, как если бы оно сломалось. В следующий момент произошел выброс почти из почвы к кровле вдоль 5-метрового участка рампы на глубину около 1 м. Шахтер получил сильные ушибы, но избежал травм, поскольку был защищен устанавливаемой стальной сеткой, свисающей между ним и выбросом.

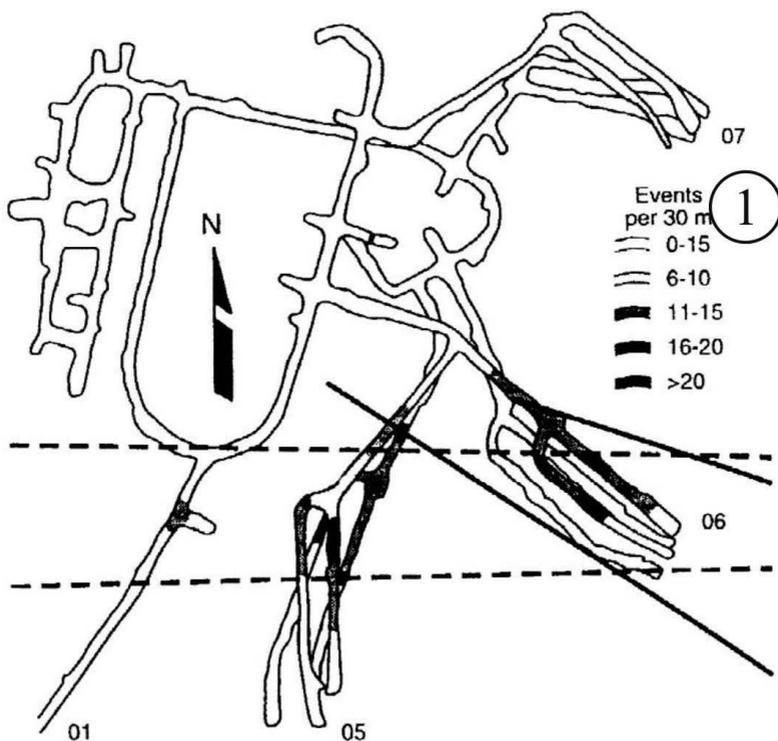


Рис. 5.46. Плотность малых сейсмических событий
1 – события в пределах 30 м.

Общими чертами всех выбросов, происходящих при работах во вскрывающих рампях шахты Lucky Friday явились:

- внезапное интенсивное трещинообразование пород, затронутых выбросом, преобразующее их в мелкие фрагменты;

- громкий внезапный хлопок, который для ближайшего наблюдателя казался исходящим из непосредственного места выброса. Представляется вероятным, что этот звук сопровождается трещинообразованием пород;

- фрагменты пород отторгались в полость рампьи перед тем, как шахтеры успевали реагировать на выброс. За начальным выбросом обломков следовал короткий период времени,

в который они продолжали выпадать вокруг места выброса. Шахтеры, присутствовавшие при этом, в общем, не были серьезно травмированы выброшенными породами, но оказались засыпанными, стоя под жидкообразным потоком обломков;

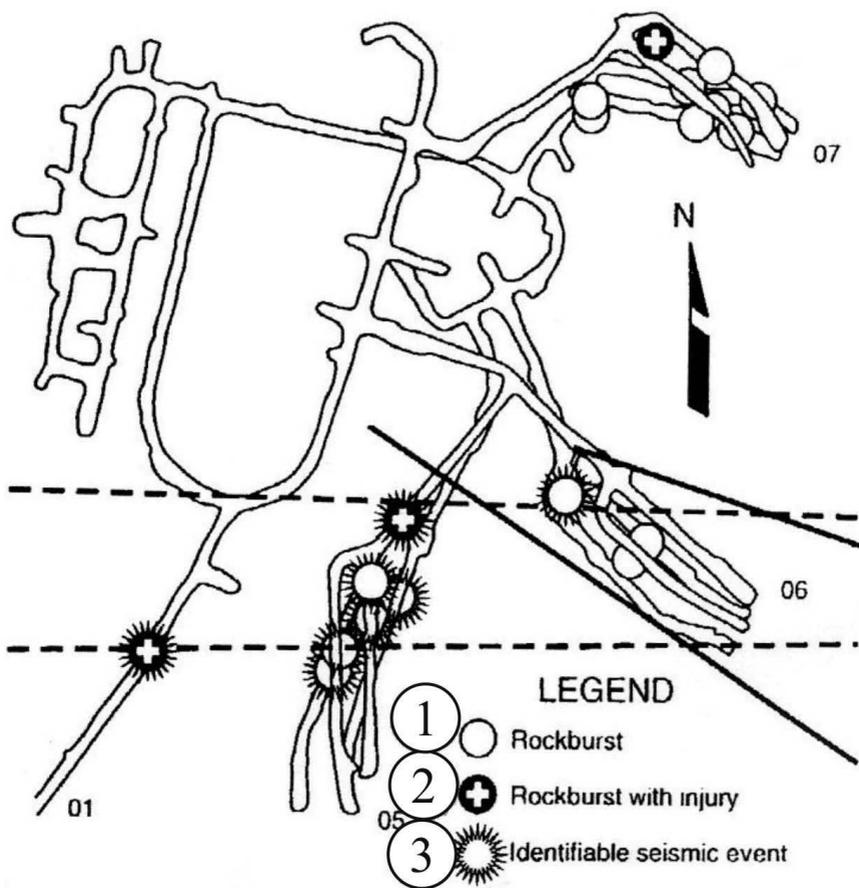


Рис. 5.47. Расположение внезапных выбросов и травматизма, вызванного ими

1 – внезапные выбросы пород; 2 – внезапные выбросы с травматизмом; 3 – идентифицируемые сейсмические события.

- густое облако пыли, поднявшееся в воздух, создало впечатление, что лампы отключились;
- через шахту проходила волна воздушного давления, за которой следовал порыв ветра, вызванный выбросом;
- сводчатая полость, образовавшаяся при выбросе, сужалась с глубиной. Свод этой полости формировался слабыми неоднородностями пород, что обнаружилось при удалении выброшенных фрагментов. Глубина образовавшихся полостей варьировалась от 30 до 120 см.

Изучение последствий выбросов показало, что почти все они вызваны горными работами, которые концентрируют напряжения, способные генерировать эти события. Существует заметное различие в сейсмической реакции на эти концентрации в разных крыльях шахты. Так, южное крыло, высоко напряженное еще до горных работ, было сейсмически более активно, чем восточное, массив которого был менее нагружен до начала отработки рудного тела, и в нем механизм концентрации напряжений возникал только после добычных работ.

Отсутствие большого ущерба от описанных внезапных выбросов объяснялось мерами, предпринятыми для противодействия им, в частности, своевременной установкой адекватной крепи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внезапный выброс пород – наиболее опасное проявление сейсмичности напряженного горного массива. Изучение причин, условий и механизма выбросов, развитие эффективных методов их прогнозирования, локализации и предотвращения тяжести последствий представляет собой важную задачу горнодобывающей индустрии и подземного строительства.

Несмотря на достижения в изучении этих проблем в последние десятилетия, остается много трудностей в их понимании и преодолении. До сих пор плохо поняты элементы времени в механизме внезапных выбросов, несмотря на то, что многие шахты используют темпы горных работ для контроля выбросоопасности и снижения сейсмического риска выбросов. Некоторые предложенные меры предотвращения выбросов и снижения тяжести их последствий, например, разгрузочное взрывание, показали неоднозначные результаты и нуждаются в последующем усовершенствовании.

Предлагаемая книга дает представление о сложности обсуждаемых вопросов, знакомит читателя с сейсмической опасностью при подземных работах и возможными техническими последствиями внезапных выбросов пород. Авторы не ставили перед собой цели создания систематизированного учебника, рассматривающего проблему внезапных выбросов с исчерпывающей полнотой. Тем более оказалось невозможным в ограниченных рамках книги дать практическое руководство к реализации современных компьютерных технологий, которые сегодня применяются в зарубежной практике прогнозирования сейсмических рисков и их количественной оценки. Поэтому авторы ограничились только общим описанием методических подходов, теоретических инструментов и практического решения задач, возникающих в ходе добычи полезных ископаемых и сооружения подземных полостей гражданского назначения.

БИБЛИОГРАФИЯ

Глава 1

A Methodology for the Definition of Geotechnical Areas within the South African Gold and Platinum Stopping Horizons.
<http://researchspace.csir.co.za/dspace/bitstream/10204/1747/1/GAP416.pdf>

M.Diederichs. Instability of Hard Rockmasses: the Role of Tensile Damage and Relaxation.
http://www.isrm.net/fotos/gca/1153999770rocka_medal_2002_die_derichs_summary.pdf

A.Dyskin. Rock Mechanics Introduction.
<http://units.civil.uwa.edu.au/teaching/MINE3160?f...>

C.Edelro. Strength, Fallouts and Numerical Modelling of Hard Rock Masses.
<http://epubl.ltu.se/1402-1544/2008/56/LTU-DT-0856-SE.pdf>

C.Edelro. Strengh of Hard Rock Masses-a Case Study.
<http://epubl.luth.se/1402-1536/2006/13/LTU-TP-0613-SE.pdf>

D.Elsworth. Technical Report: Geo-Science and Geo-Engineering Research at DUSEL.
http://www.lbl.gov/nsd/homestake/PDFs/CDR/CDRAppendices/A08_DUSEL%20GeoTech...

S.Glaser. New Directions in Rock Mechanics.
http://216.119.67.159/documents/frel_downloads/new_direct_rep.pdf

Mining R&D at Xstrata Nickel.
http://www.bergforsk.se/presentationer/xstrata_swan_070524

Hard Rock Miner's Handbook.
<http://www.mnl.lng.psu.ac.th/pdf/HRMH3.pdf>

E.Hoek. In Situ and Induced Stresses.
http://www.rocscience.com/hoek/pdf/Practical_Rock_Engineering.pdf

E.Hoek. Practical Rock Engineering.
<http://www.rocscience.com/hoek/PracticalRockEngineering>

E.Hoek. Rock Mechanics-an Introduction for the Practical Engineer.

<http://www.rocscience.com/hoek/references/H1966a.pdf>

E.Hoek. The development of Rock Engineering.

http://www.rocscience.com/hoek_the_development_of_rock_engineering.pdf

C.Martin. Stress Path and Instability around Mine Openings.

http://www.rocscience.com/library/pdf/DerekMartin_Paris.pdf

Rock Mechanical Analysis in Deep Underground Tunnel Projects for High Level Nuclear Waste Disposals.

<http://www.tensionline.com/intl/pdfpublicview.jsp?url=...>

Глава 2

T.Bennet. Seismic Characteristics and Mechanized of Rockbursts.

<http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADP204470&Location=428doc...>

N.Gay. Rockbursts and Seismicity in Mines, Johannesburg, South African Institute of Mining and Metallurgy, 1984

N.Gay. Rock-engineering Strategies to Meet Safety and Production needs of the South African Mining Industry in the 21st Century.

<http://www.saimm.co.za/Journal/v095n03p115.pdf>

N.Gay. The Development of Rock Mechanics in the South African Minerals Industry.

http://www.issi.co.za/Y27dave_overlepp/papers/18.pdf

S.Gibowich. Seismicity Induced by Mining: Recent Research.

<http://private.igf.edu.pl/~debski/DOWNLOAD/Gibowicz-AIG-51.pdf>

R.Durrheim. Factor Influencing the Severity of Rockburst Damage in South African Gold Mines

<http://www.saimm.co.za/Journal/v098n02p053.pdf>

L.Howard. SME Mining Engineering Hand Book. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 1992

W.Hustrulid. Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case.

Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 2001

P.Kaiser. Lessons Learned for Deep Tunneling from Rockbursts in Mining.

<http://www.zlg.ethz.ch/downloads/publ/PDF-ZLG-SI/12.pdf>

K.Larsson. Mining Induced Seismicity in Sweden.

<http://epubl.luth.se/1402-1757/2004/80/LTULic-0480-5E.pdf>

K.Larsson. Seismicity in Mines.

<http://epubl.luth.se/1402-1536/2004/22/LTU-TR-0422-SE.pdf>

H.Maleki. Geotechnical Factors Influencing Violent Failure in US Mines.

<http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pdfs/gfiv.pdf>

D.Ortlepp. The Mechanism of a Rockburst-an Informative Study.

http://www.issi.co.za/Y27/dave_ortlepp/papers/65.pdf

D.Ortlepp. Thoughts on the Rockburst Source Mechanism Based on Observations of the Mine-Induced shear rupture.

http://www.issi.co.za/Y27/dave_ortlepp/Papers/54.pdf

Proceedings: Mechanics and Mitigation of Violent Failure in Coal and Hard Rock Mines.

<http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pdfs/sp01-95.pdf>

P.Stevens. A Review of the Effects of Earthquakes on Underground Mines.

<http://www.arblast.osmre.gov/downloads/UG%20vibrations/stevens%20-%A%20Review%20of%20the...>

Глава 3

A.Bobet. Induced Slip on a Large Scale Frictional Discontinuity: Coupled Flow and Geomechanics

http://audio.rambler.ru/export/radio_player.html?id=807

F.Boler. Seismicity and Stress Changes Subsequent to Destress Blasting at the Galena Mine and Implications for Stress Control Strategies.

<http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pdfs/Ri9448.pdf>

Design Guidelines for the Dynamic Behavior of Ground Support Tendons.

<http://www.masha.on.ca/update/public/datasheets/CANMET%20MMSL%20-section%201%200808.pdf>

DYWIDAG-Systems International.

<http://www.gewi-system.com/en/product-images.html>

Engineering of Large and Deep Rock Caverns for Physics Research.

<http://www.slac.stanford.edu/econf/co504071/pdf/duffault/pdf>

N.Gay. Rock-engineering Strategies to Meet the Safety and Production Needs of the South African Mining Industry in the 21st Century.

<http://www.saimm.co.za/Journal/v095n03p115>

O.Goldbach. Flooding-Induced Seismicity in Mines.

http://sagaonline.co.za/2009Conference/CD%Handout/SACA%202009/PDFs/Abstracts_and...

A.Haile. Strata Control in Tunnels and an Evaluation of Support.

<http://reasearchspace.esir.co.za/dspace/bitstream/10204/1617/1/GAP026.pdf>

D.Heerden. Rock support in Southern African Hard Rock Mines.

http://www.platinum.org.za/Swakopmund2007/Papers/077-092_van%20Heerden.pdf

R.Heunis. The Development of Rockburst Control Strategies for South African Gold Mines.

<http://www.saimm.co.za/publications/downloads/v080n04p139.pdf>

E.Hoek. Support in Underground Hard Rock Mines.

<http://www.roscience.com/hoek/references/H1987.pdf>

E.Hoek. Support of Underground Excavations in Hard Rock.
http://www.roscience.com/hoek/references/support_of_Underground_Excavation_in_Hard_Rock...

ITA REPORT-WG12: Shotcrete for Rock Support.
<http://www.ita-aites.org/cms/fileadmin/Generals/pdf/ItaAssociation/ProductionPublication/WorkingGroupsPublication/WG12...>

P.Kumar. A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Applied Science.
https://cipcle.ubc.ca/bitstream/2429/13938/1/ubc_2003-0109.pdf

C.Li. Performance of the Swellex Bolt in Hard and Soft Rocks.
http://folk.ntnu.no/charliel/Conf_Swellex_Aus99.pdf

H.Mitri. Destress Blasting in Hard Rock Mines a State-of-the-art review.
<http://www.cim.org/bulletin/bulletinlive/articles.cfm?Issue-1D>

D.Ortlepp. A Simple Yielding Element for Steel Reinforcement in Earthquake-Resistant Structures.
<http://www.infomine.com/publications/docs/ortlepp2005.pdf>

D.Ortlepp. Dynamic Capacity in Cable Anchors and Rockbolts.
http://www.issi.co.za/Y27/dave_ortlepp/papers/73.pdf

D.Ortlepp. Dynamic Testing of a Yielding Cable Anchor.
http://www.issi.co.za/Y27/dave_ortlepp/papers/70.pdf

D.Ortlepp. Grouted Rock-Studs as Rockburst Support: A Simple Design Approach and an Effective Test Procedure.
http://www.issi.co.za/Y27/dave_ortlepp/Papers/36.pdf

D.Ortlepp. Static and Dynamics Load-Displacement Characteristics of a Yielding Cable Anchor Determined in a Novel Testing Device.

http://www.acg.uwa.edu.au/_data/page/2147/paper_web.pdf

D.Ortlepp. The Durabar-a Yieldable Support Tendon-Design Rationale and Laboratory results.
http://www.issi.co.za/Y27/dave_ortlepp/papers/57.pdf

D.Ortlepp. Technical Note: Safety and Cost Implications in the Spacing of Support.

http://www.issi.co.za/Y27/dave_ortlepp/papers/39.pdf

D.Ortlepp. The Mechanism of Rock Outbursts in a Quartzite Tunnel in a Deep Gold Mine.

<http://www.issi.co.za/Y27/dave-ortlepp/papers...>

Rockbursts: Prediction and Control: Papers Presented at a Symposium /Organized by the Institution of Mining and Metallurgy in Association with the Institution of Mining Engineers and held in London on 20 October, 1983, London, Institution of Mining and Metallurgy. 1983

J.Rutledge. Faulting Induced by Forced Fluid Injection and Fluid Flow Forced by Faulting: an Interpretation of Hydraulic Fracture Microseismicity, Carthage Cotton Valley Gas Field, Texas.

http://www.lanl.gov/orgs/ees/ees11/geophysics/microeq/preprints/cv_bssa_reprint.pdf

V.Seldak. Energy Evaluation of Destressing Blasting.

<http://actamont.tuke.sk/pdf/1997/n1/2seldak.pdf>

Shotcrete for Rock Support.

<http://www.ita-aites.org/cms/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ProductAndPublication...>

T.Stacey. Tunnel Surface Support-Capacities of Various Types of Wire Mesh and Shotcrete Under Dynamic Loading.

http://www.issi.co.za/Y27/dave_ortlepp/papers/59.pdf

T.Stacey. Energy Absorbing Capacity of Reinforced Shotcrete with Reference to the Containment of Rockburst Damage.

http://www.issi.co.za/Y27/dave_ortlepp/papers/38.pdf

B.Tang. Rockburst Control Using Destress Blasting.

<http://digitool.library.mcgill.ca/view/actionsingleViewer.do?dvs=1270567410517...>

M.Turner. Seismicity at Big Bell Mine.

<http://www.curlymike.com.au/pdf/paper.pdf>

M.Vandewall. The Use of Steel Fibre Reinforced Shotcrete for the Support of Mine Openings.

<http://www.saimm.co.za/Journal/v098n03p113.pdf>

F.Viera. Further Validation of Bracket Pillar Design Methodology.

<http://researchspace.csir.co.za/dspace/bitstream/10204/1761/1/gap516.pdf>

T.Williams. Underhand Cut and Fill Mining as Practiced in Three Deep Hard Rock Mines in the United States.

<http://www.cdc.gov/Niosh/mining/pubs/pdfs/ucafm.pdf>

Yieldable Grouted Studs.

<http://www.steeledableses.co.za/YieldableGroutedStuds.htm>

Глава 4

Digital Theses Repository-adt-WU2005.0031.

<http://theses.library.uwa.edu.au/adtpWU2005.0031/>

B.Dombrowski. Combination of Rockburst Monitoring and Seismic Exploration Ahead of the Tunnel Face: a New Seismic Concept for Hazard Reduction.

<http://www.diamond-congress.hu/Attila/ita/wtc2009/oralpapers/0-02-10.pdf>

Generic Seismic Risk Management Plan.

http://acq.uwa.edu.au/research/underground_mining/mine_seismicity_and_rockburst.risk...

F.Essrich. Quantitative rockburst hazard assessment at Elandsrand Gold Mine.

<http://www.saimm.co.za/publications/downloads/v097n07p319.pdf>

V.Frid. Electromagnetic Radiation Method for Rock and Gas Outburst Forecast.

<http://www.art-and-science.net/VFRIDFiles/frid98.pdf>

Z.Guand. Prediction and Control of Rockburst During Deep Excavation of a Gold Mine in China.

<http://www.rockmech.org/qikap/manage/wenzhang/2003-10-06.pdf>

F.Heuse. Rockbursts as Opportunities for the Concealment of Nuclear Tests.

<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/10131396-Pg1L9q/native/10131396.pdf>

M.Huduma. Mining-Induced Seismicity in Underground Mechanized Hard Rock Mines.

http://www.ms-rap.com/ACG_mine_seismicity_Downloads?action=AttachFile&do...

M.Huduma. Seismic Monitoring in Mines-Old Technology-New Applications.

http://www.ms-rap-com/ACG_mine_seismicity_Downloads?action=AttachFile&do...

T.Li. Comprehensive Integrated Methods of Rockburst Prediction in Underground engineering.

<http://www.iaeg.info/iaeg2000/PAPARS/IAEG-594PDF>

T.Ohta. Core Disking and Rockburst in Soft Tuffaceous Rock Masses at Iwate Tunnel.

http://www.jstage.jst.go.jp/article/rtrigr/42/3/130_pdf

D.Ortlepp. RaSiM Comes of Age-A Review of the Contribution to the Understanding and Control Of Mine Rockbursts.

http://www.acq.uwa.edu.au/_data/page/2147/ortlepp_keynote_web.

M.Owen. Exposure Model: Detailed Profiling and Quantification of the Exposure of Personnel to Geotechnical Hazards in Underground Mines.

<http://theses.library.uwa.edu.au/adt-WU2005.0031>

Y.Potvin. Strategies and Tactics to Control Seismic Risks in Mines.

<http://saimm.server291.com/Journal/v109n03p177.pdf>

D.Scott. Geophysical Methods to Detect Stress in Underground Mines.

<http://www.cdc.gov/mining/pubs/pdfs/R19661.pdf>

D.Scott. Investigation of Electromagnetic Emissions in a Deep Underground Mine.

<http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pdfs/ioeei.pdf>

Seismic Risk Management Plan.

http://www.acq.uwa.edu.au/research/underground_mining/mine_sismicity_and_rockburst_risk_management/bodycopy.php?f=30530

D.Stevens. Sandstone Samples Using Acoustic Emission Tomography in the Laboratory.

http://scholar.lil.vt.edu/these/available/etd-05172007-111927/unrestricted/Steven_...

D.Stevens. Stress Redistribution in Berea Sand Stone Samples Using Acoustic Emission Tomography in the Laboratory.

http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-05172007-111927/unrestricted/Stevens_Thesis.pdf

F.Viera. Probabilistic Mine Design Methods to Reduce Rockburst Risk.

<http://www.saimm.co.za/publications/downloads/v102n04p231.pdf>

X.Wang. Dynamic Analysis of Fault Rockburst Based on Gradient-Dependent Plasticity and Energy Criterion.

<http://www.ustl.edu.cn/xuebaozi/whole/e2004-1/2.pdf>

Глава 5

F.Boler. Seismicity and Stress Changes Subsequent to Destress Blasting at the Galena Mine and Implications for Stress Control Strategies.

<http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pdfs/ri9448.pdf>

In Situ Stress at the Lucky Friday Mine.

<http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pdfs/ri9567.pdf>

M.Poad. Underhand Longwall Program at Lucky Friday Mine, Mullan, ID.

<http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pdfs/spo/-95.pdf>

D.Scott. Investigation of a Rock Burst Site, Sunshine Mine, Kellogg, Idaho.

<http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/crbs.pdf>

B.White. Geological Factors in Rock Bursts in the Coeur D'Alene Mining District: Structure.

<http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pdfs/spo/-95.pdf>

B.White. Mechanics of a Large Strain-type Rock Bursts and Design for Prevention.

<http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pdfs/moals.pdf>

B.White. Role of Fault Slip on Mechanisms of Rock Burst damage, Lucky Friday Mine, Idaho, USA

<http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pdfs/rofso.pdf>

J. Whyatt. 60 years of Rockbursting in the Coeur d'Alene District of Northern, Idaho, USA.

Lessons Learned and Remaining issues.

<http://cdr.gov/niosh/mining/pubs/pdfs/yorit.pdf>

J.Whyatt. Rock Bursting and Seismicity During Ramp Development Lucky Friday Mine, Mullan, Idaho.

<http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pdfs/rbsdr.pdf>

Наукове видання

**КАУФМАН Леонід Лазаревич
ЛИСІКОВ Борис Артемович**

**СЕЙСМІЧНІ РИЗИКИ
РАПТОВИХ ВИКИДІВ ПОРОД**

(Російською мовою)

Технічний редактор: Сірацьов Ігор Жамельжанович,
гірничий інженер-будівельник

Підписано до друку 02.11.2010. Формат 60x84^{1/16}
Обл.-вид. арк. 25,1. Ум. друк. арк. 24,41
Друк лазерний. Наклад 500 прим. Зам. № 0529

Видавничий дім «Норд-Прес»
Св. про держреєстрацію ДК №839 від 1.03.2002
м. Донецьк, вул. Разенкова, 6

Віддруковано у друкарні «Норд Комп'ютер»
на цифрових лазерних видавничих комплексах
Rank Хегох DocuTech 135 і DocuColor 2060
83003, Україна, м. Донецьк, вул. Разенкова, 6
Тел.: (062) 389-73-82, 389-73-86