

*На правах рукописи*

**ЩЕДРИНА Наталья Николаевна**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
МАССИВОВ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ С  
НЕИЗУЧЕННЫМ ХАРАКТЕРОМ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ**

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
М. А. ИОФИС

Москва 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 4  |
| 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА<br>ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НА<br>МЕСТОРОЖДЕНИЯХ.....                                 | 9  |
| 1.1 Обобщение опыта по изучению сдвижения горных пород.....  | 9  |
| ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 .....  | 31 |
| 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ<br>ГОРНЫХ ПОРОД И ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ<br>С НЕИЗУЧЕННЫМ ХАРАКТЕРОМ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ..... | 33 |
| 2.1 Основные понятия и угловые параметры процесса сдвижения горных<br>пород и земной поверхности.....  | 34 |
| 2.2 Определение величины угла сдвижения земной поверхности на<br>месторождениях с неизученным характером процесса сдвижения.....                               | 40 |
| ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2 .....  | 52 |
| 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ СОСТОЯНИЕ<br>И СТРОЕНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД .....  | 53 |
| 3.1 Анализ зависимости прочности горных пород на сжатие от глубины их<br>залегания .....   | 53 |
| 3.2 Анализ влияния влажности на прочностные свойства горных пород.....   | 56 |
| 3.3 Аналитический метод определения параметрического значения<br>коэффициента структурного ослабления .....  | 60 |
| ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 .....  | 73 |
| 4 УСТАНОВЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И<br>СОСТАВЛЕНИЕ ИХ КЛАССИФИКАЦИИ .....   | 75 |
| 4.1 О состоянии классификации месторождений полезных ископаемых.....   | 75 |
| 4.2 Оценка состояния классификаций критериев подобия месторождений<br>полезных ископаемых.....   | 77 |
| 4.3 Классификация горных пород в массиве по<br>прочности.....  | 83 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.4 Классификация горных пород в массиве по трещиноватости. Коэффициент структурного ослабления .....   | 87  |
| 4.5 Определение состояния массива горных пород. Сведение всех классификаций к единой классификации.....   | 92  |
| ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 .....   | 102 |
| 5 ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ НАД ГОРНЫМИ РАБОТАМИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ – АНАЛОГОВ ПРОВАЛОВ И КРУПНЫХ ТРЕЩИН ..... | 104 |
| 5.1 Основные факторы, определяющие образование провалов и крупных трещин в массиве горных пород.....  | 104 |
| 5.2 Иерархически блочная структура и характерные зоны массива горных пород.....   | 106 |
| 5.3 Разработка методики решения обратной геомеханической задачи при образовании над горными работами месторождений – аналогов провалов и крупных трещин.....                | 113 |
| ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5 .....   | 122 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....  | 123 |
| Список использованных источников .....  | 125 |

## ВВЕДЕНИЕ

### *Общая характеристика работы*

**Актуальность проблемы.** В последнее время, в связи с истощением запасов полезных ископаемых, расположенных в благоприятных условиях, все чаще приходится вовлекать в добычу месторождения, залегающие на больших глубинах и в сложных, недостаточно изученных, а иногда и совсем неизученных условиях. Особенно остро ощущается эта ситуация в период проектирования горнодобывающих предприятий, когда принимаются базовые технические решения, от надежности которых во многом зависит будущее этих предприятий. Но именно в этот период на месторождениях с неизученным характером процесса сдвижения имеется очень мало исходных данных, необходимых для надежного обоснования принимаемых технических решений. Определение углов сдвижения, используемых для построения предохранительных целиков, производится по способу проф. Д.А. Казаковского, базирующегося на зависимости этих углов от прочностных свойств горных пород, вмещающих полезное ископаемое. В настоящее время этот способ имеет ограниченную область применения по ряду причин, основными из которых являются:

- способ составлен более полувека тому назад и сильно устарел. Ее автор базировался на свойствах пород, определяемых по керну скважин в лабораторных условиях. Практика горного дела показала, что для блочно-слоистого массива горных пород, каким является этот массив на большинстве месторождений, являются структура, состояние и строение массива, которые в способе Д.А. Казаковского не учитываются.

- способ составлялся в период, когда горные работы велись на малых глубинах, и основной мерой охраны подрабатываемых объектов было оставление предохранительных целиков. В современных условиях эта мера охраны совершенно недопустима, так как размеры целиков растут пропорционально квадрату глубины горных работ, при этом стоимость каждой тонны вскрытых и

подготовленных к выемке запасов полезного ископаемого, оставляемых в целике, также увеличивается. Поэтому современные Правила охраны сооружения базируются на инженерных методах расчета, для выполнения которых требуется более подробная информация о геомеханическом состоянии массива горных пород, чем она содержится в существующей классификации.

- способ базируется на одном показателе – прочности пород, в то время как геомеханическое состояние массива определяется, прежде всего, отношением нагрузки на горную породу к ее прочности. При одной и той же прочности пород это отношение, в зависимости от глубины, может меняться в несколько раз, что необходимо учитывать, особенно при современных глубинах разработки месторождений полезных ископаемых.

Следовательно, способ Д.А. Казаковского для оценки геомеханического состояния массива горных пород и прогноза изменения этого состояния под влиянием горных работ имеет ограниченную область применения. Между тем геомеханическое состояние массива горных пород входит в число основных исходных данных, на базе которых выбираются система разработки и ее параметры, виды крепи горных выработок и способы управления горным давлением, методы охраны сооружений поверхности и другие технические решения.

В соответствии с изложенным, развитие методов оценки механических характеристик массивов осадочных пород на месторождениях с неизученным характером процесса сдвижения, включающее разработку классификаций критериев подобия месторождений полезных ископаемых с учетом современных условий их освоения, является важной и актуальной задачей.

**Цель диссертационной работы** является повышение эффективности геомеханического обеспечения освоения месторождений твердых полезных ископаемых с неизученным характером процесса сдвижения путем установления и использования зависимостей параметров этого процесса от основных влияющих факторов.

**Идея работы** использование критериев подобия месторождений с изученным характером процесса сдвижения и взаимосвязи показателей неоднородности массива горных пород, полученных в лабораторных и натуральных условиях, для определения параметров геомеханических процессов на месторождениях с неизученным характером процесса сдвижения.

**Для достижения поставленной цели** в работе сформулированы и решены следующие основные задачи:

1. Установить критерии подобия месторождений и составить их классификацию.
2. Определить показатели, характеризующие состояние и строение массива горных пород.
3. Установить зависимость угловых параметров сдвижения горных пород от основных влияющих факторов.
4. Определить условия образования провалов на месторождениях-аналогах и разработать методы установления местоположения полостей в толще горных пород, вызывающих эти провалы.

#### **Методы исследования поставленных задач**

Для решения поставленных задач в работе использован комплексный метод исследований, включающий анализ и обобщение имеющегося опыта применения методики установления месторождений – аналогов, изучение свойств и состояния горных пород в натуральных и лабораторных условиях, сопоставление результатов расчета с данными наблюдений и оценку их точности.

#### **Основные защищаемые положения:**

1. Классификация критериев подобия, базирующаяся на показателях, характеризующих строение, свойства и состояние массивов горных пород на этих месторождениях, позволяющая существенно упростить и повысить надежность выбора месторождений – аналогов.

2. Зависимость угловых параметров сдвижения горных пород от основных влияющих факторов, отражающая роль каждого из них в развитии общего процесса деформирования подрабатываемого массива горных пород, что существенно расширяет возможности управления этим процессом.

3. Метод оценки механических характеристик горных пород путем учета их неоднородностей, выражаемых отношением сопротивления пород растяжению или сдвигу к сопротивлению сжатию, позволяющий использовать данные лабораторных исследований образцов пород для определения механических характеристик массива.

4. Методика прогноза и учета образования над горными работами провалов и крупных трещин при выборе месторождений аналогов, направленная на предотвращение разрушений подрабатываемых объектов на месторождениях с неизученным характером процесса сдвижения.

#### **Научная новизна:**

1. Установлено, что показатель неоднородности массива горных пород находится в прямой зависимости от отношения сопротивления пород на растяжение или сдвиг к их сопротивлению сжатию и выражается корнем квадратным из этого отношения.

2. Показано, что для определения угловых параметров сдвижения горных пород на месторождениях с неизученным характером процесса сдвижения необходимо и достаточно учитывать четыре основных фактора, характеризующие свойства, состояние, строение и горно-геологические условия разработки месторождения.

3. Разработана классификация критериев подобия месторождений (аналогов), впервые обеспечивающая необходимой информацией при проектировании освоения месторождений с неизученным характером процесса сдвижения.

4. Получила развитие теория подобия в строении и деформировании горных пород на микро- и макроуровнях.

**Достоверность научных положений и выводов** обоснована использованием современных методов теоретических исследований, базирующихся на основных достижениях в области геомеханики, соответствием результатов расчетов критериям действующих нормативных документов и опыту ведения добычных работ на горнодобывающих предприятиях.

**Практическая ценность работы** заключается в том, что разработанная классификация критериев подобия позволяет решать вопросы, возникающие при составлении проектов освоения месторождений с неизученным характером процесса сдвижения, в частности обеспечить необходимыми достоверными данными о свойствах, состоянии, строении и горно-геологических условий разработки месторождений.

**Апробация результатов работы.** Основные научные положения и результаты исследований обсуждались на научных симпозиумах «Неделя горняка – 2010» (Москва, МГГУ), на секционных заседаниях 7-й, 8-й, 9-й Международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, ИПКОН РАН, 2010-2013).

**Публикации.** Результаты исследований отражены в 8 опубликованных работах, 4 из которых - в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 132 страницах машинописного текста, содержащих 19 рисунка, 19 таблиц, список литературы из 93 наименований.

# **1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

## **1.1 Обобщение опыта по изучению сдвижения горных пород**

Подземная разработка месторождений приводит к нарушению геомеханического равновесия горного массива в пределах шахтных полей, сдвигению и разрушению горных пород. Поэтому на стадии разработки проектной документации и освоения месторождения необходимо прогнозировать геомеханическое состояние массива горных пород в целях обеспечения промышленной безопасности в добывающих регионах. Но прежде чем излагать новые положения, предлагаемые нами, необходимо остановиться на состоянии изученности явления сдвижения горных пород.

В процессе формирования горных наук область знаний, связанная с изучением сдвижения горных пород, претерпела ряд изменений и неоднократно переходила из одной группы в другую, в зависимости от решаемых этой наукой на определенном историческом этапе задач и используемых при систематизации признаков. Долгое время задачи, решаемые с помощью положений науки о сдвижении горных пород, относились к области знаний, называемой маркшейдерским искусством. Позже эта область знаний стала называться маркшейдерским делом или сокращенно маркшейдерией. Многие методы, приборы и инструменты, используемые в маркшейдерии, применяются в настоящее время и при изучении сдвижения горных пород. Вместе с тем, при анализе и обобщении полученных результатов все больше используются методы геомеханики. Природа и механизм сдвижения горных пород рассматриваются в тесной связи с напряженно-деформированным состоянием породного массива и происходящими в нем геомеханическими процессами. Поэтому необходимое представление о состоянии и развитии науки о

сдвигении горных пород можно получить только при изучении ее истории в должной увязке с историей маркшейдерии и особенно геомеханики.

Становление геомеханики как науки началось с формирования и развития механики горных пород, которая входит в физику горных пород и процессов в качестве ее части. Механике горных пород, в отличие от классической механики, свойственны специфические методы и области применения, связанные с особенностями горных пород как объекта изучения [1].

Основными задачами, решаемыми в геомеханике, являются управление горным давлением в целях безопасного и рационального извлечения полезного ископаемого, учет и оценка нарушений начального состояния объектов, расположенных в зоне влияния горных работ, как в массиве, так и на земной поверхности. Сокращенно эти проблемы стали называться горным давлением и сдвижением горных пород. По методам изучения геомеханических процессов геомеханика подразделяется на аналитическую и эмпирическую. На рубеже XIX-XX вв. стали формироваться представления и высказываться гипотезы о горном давлении. Им предшествовали начатые во второй половине XIX в. инструментальные наблюдения за сдвижением горных пород и оседанием дневной поверхности. Исходя из наблюдений за деформациями горных пород, раскрытием трещин и разрывами, горные инженеры Европейских стран и США во второй половине XIX в. стали приходить к выводу о существовании «собственных напряжений» в горных массивах. В России вопросы, относящиеся к геомеханике, впервые были поставлены на страницах "Горного журнала", основанного в 1825 г. В нем периодически публиковались материалы различных авторов, анализирующих методы подземной разработки угольных и рудных месторождений с позиций механики горных пород.

Сдвигение горных пород и земной поверхности, связанное с подземными разработками, привлекает внимание деятелей горного дела в течение нескольких столетий. Уже давно установлено, что характер и интенсивность сдвижений зависят от целого ряда геологических и горноэксплуатационных

факторов. При определенных условиях эти сдвигения не представляют угрозы для сооружений, попадающих в зону влияния горных разработок. В других случаях, наоборот, они настолько велики, что вызывают повреждение или разрушение сооружений.

Проблема сдвигения горных пород тесным образом связана с вопросами охраны недр и безопасности горных работ. Несмотря на многовековую историю, решение этой проблемы долгое время шло медленными темпами.

Первые попытки теоретических построений, объясняющих сдвигение пород вплоть до поверхности, относятся уже к началу 18 - ого столетия. В 1838 г. Туайе, занимаясь вопросами обрушения пород, высказал мысль, что излом пород происходит по плоскостям, перпендикулярным к напластованию. Несколько позже 1858 г. бельгиец Гоно развил эту мысль. Теория Туайе-Гоно [87], получила впоследствии название «правила нормалей». Теория Туайе-Гоно, вытекает из следующих рассуждений. Вес пласта кровли, разлагается на составляющие: нормальную к напластованию и действующую вдоль пласта. Последняя уравнивается реакцией нижележащих пород, и движение кровли будет происходить только под влиянием нормальной составляющей.

Отсюда следует, что плоскости изломов у нижней и верхней границ выработки будут иметь одинаковые направления.

Следует отметить, что во времена Гоно разработки велись на сравнительно неглубоких горизонтах, причем, вверху пласты обычно отрабатывались ранее, так что угол  $\gamma$  нельзя было получить и, следовательно, нельзя было проверить справедливость «теории нормалей» в этой части. Что же касается угла  $\beta$ , то такие случаи, как, например, повреждение жилых кварталов города Льежа, казалось, подтверждали справедливость этой теории. Несмотря на свою, казалось бы, примитивность, этой теории суждено было сыграть большую роль в истории развития рассматриваемых вопросов. Долгое время вокруг этой теории шел спор. Теория Туайе-Гоно, несмотря на многочисленные возражения,

получила распространение в Бельгии и горнопромышленных районах Северной Франции.

Несколько позже (1871 г.) выступил бельгиец Г. Дюмон [85] с большим трудом, написанным по поручению городского управления Льежа. В основном Дюмон поддерживает Гоно и значительно развивает вообще теорию сдвижения горных пород.

Верхний предел угла падения, при которой направление поверхности излома уже отклоняется от нормали, Дюмон находит равным  $68^\circ$ , указывая, что такие породы, как песчаник и сланец, будут удерживаться трением и не будут сдвигаться по плоскостям с наклоном меньше  $22^\circ$ .

В остальных случаях направление плоскостей излома, по Дюмону, должно совпадать с нормалью к напластованию. Он так же, как и Гоно, полагал, что покрывающая толща состоит из согласно залегающих слоев песчаника, сланцев и других пород и что изломы в такой среде происходят в каждом слое последовательно.

К этой теории Дюмон, однако, делает ряд дополнений. Прежде всего, он придает большое значение тектоническим нарушениям, влияющим на направление поверхностей изломов. Так представляя себе роль складчатости в распространении изломов, Дюмон, развивая теорию нормали, строит в толще пород линию излома, строго следуя нормали к напластованию. Далее Дюмон указывает, что дизъюнктивные нарушения могут отклонять направление поверхности излома от нормали к пласту. Отклонение от нормали, как полагал он, может быть вызвано наличием наносов, обычно залегающих несогласно с коренными породами; угол излома в наносах он принимал от  $30$  до  $58^\circ$ .

Как увидим ниже, все эти положения оказались весьма дискуссионными, но у Дюмона мы находим суждения, не вызывающие до наших дней никаких возражений.

В специальной главе он останавливается на вопросах повреждения поверхности и находящихся на ней сооружений. Здесь автор довольно подробно анализирует мутьду сдвижения с точки зрения опасности различных ее частей для сооружений и приходит к выводу, что опасными являются места, составляющие краевую зону мутьды сдвижения. Сопоставляя это обстоятельство с характером распределения оседаний, Дюмон приходит к заключению, что повреждения происходят не от оседаний, а от неравномерности таковых, т. е. что для сооружений опасны не абсолютные оседания, а относительные, создающие наклоны поверхности и сооружений. Значение неравномерности оседаний получило дальнейшее развитие в работах более поздних исследователей, но здесь уместно подчеркнуть, что это одно из важных положений современного учения о повреждениях сооружений под влиянием горных разработок было высказано со всей определенностью еще в 1871 г.. Дюмон полагал, что сооружение, попавшее в середину мутьды, меньше пострадает, нежели сооружение, находящееся в краевой зоне мутьды.

Не вызывает возражений до сих пор и его суждение о том, что для уменьшения повреждений поверхности следует вести разработки одновременно сплошным забоем на возможно большей площади. При этом автор указывал, что оставление недостаточных целиков приносит скорее вред, чем пользу, а в очистных пространствах не рекомендовал оставлять какие бы то ни было целики, так как это неблагоприятно отражается на состоянии поверхности.

Вопрос о соотношении между оседанием поверхности и мощностью разрабатываемого пласта — один из основных вопросов сдвижения поверхности, и ему в последующих исследованиях уделялось много внимания. Уменьшение оседания с увеличением глубины связывалось с увеличением в объеме сдвигающихся пород. Отсюда возникло предположение, что при некотором соотношении между мощностью пласта и глубиной его залегания оседание может не достичь поверхности, затухнув в толще пород вследствие увеличения

последних в объеме. Такая глубина получила даже особое название – «мертвой глубины».

Последующие исследования не подтвердили существования „мертвой глубины", т. е. при достаточно большой площади очистных выработок по сравнению с глубиной всякий раз сдвигения достигают поверхности.

Таким образом, уже в работе Дюмона были затронуты главнейшие вопросы сдвигения дневной поверхности.

«Теория нормалей» подверглась критике со стороны профессора Ржиха. В 1882 г. Ржиха опубликовал свою теорию, сущность которой сводилась к тому, что над выработкой породы обрушаются, и область обрушения принимает форму параболоида. Но на этом процесс не заканчивается. Перенапряженность в окружающих породах вызывает дальнейшие разрушения их и дальнейшее сдвигение. Сдвигение будет охватывать последовательно зоны. Процесс закончится, когда граница обрушившихся пород ограничится линией, проведенной под углом естественного откоса данной породы. Таким образом, Ржиха приходил к заключению, что мульда оседания оконтуривается углами естественного откоса.

Согласно взглядам Ржиха, сдвигение пород происходит только в виде обрушений, в частности отрицается изгиб пород. Последнее нельзя признать правильным. Кроме того, к недостаткам теории Ржиха следует отнести то обстоятельство, что в ней не различались углы  $\gamma$ ,  $\delta$  и  $\beta$ . Положительный аспект в теории Ржиха заключается в том, что здесь впервые указывалось на зависимость сдвигения пород от механических свойств горных пород. Несмотря на ряд недостатков, теория Ржиха явилась значительный шагом вперед.

Почти одновременно с теорией Ржиха опубликовал свою работу Файоль. Наблюдения за сдвигением поверхности и лабораторные исследования на моделях привели Файоля к теории, несколько схожей с теорией Ржиха. Прежде всего, Файоль также допускал форму сдвигения пород в виде

обрушения. Область, затрагиваемая сдвижением, по Файоллю, имеет форму купола. При этом автор теории полагал, что купол будет сохранять свою устойчивость и после того, как механизм свода не будет уже существовать. Последнее он объяснил способностью пород увеличиваться в объеме и заполнять все свободное пространство внутри купола.

К 1876 - 1884 гг. относится обстоятельно разработанная теория Ичинского [90]. Автор теории рассматривает факторы, влияющие на течение процесса, и выделяет из них наиболее важные:

- 1) мощность пласта;
- 2) угол падения;
- 3) глубину залегания;
- 4) механические свойства покрывающих пород.

Сам процесс сдвижения пород, по Ичинскому, распадается на два периода, из которых первый - это процесс быстрого обрушения и второй - сдвижение пород. При этом автор считает, что, кроме обрушения, сдвижение пород может происходить и в виде прогиба и в виде течения массы. В частности, он полагал, что в каменноугольных породах происходят обрушения, а в наносах прогиб. Такая точка зрения представляла существенное дополнение к ранее высказанным взглядам.

В конце прошлого столетия (1895 - 1897 гг.) предложил свою теорию Гауссе, ее особенно поддерживал известный отечественный ученый профессор П.М. Леонтовский. Гауссе в своих рассуждениях придает большое значение механическим свойствам пород и их чередованности. Значительное внимание уделено роли систем разработок, в частности подчеркнута, что при работах с закладкой преобладает прогиб пород.

В 1908 - 1914 годах М. М. Протодьяконов принял участие в создании многотомного капитального труда «Описание Донецкого бассейна», в котором

им были написаны следующие разделы: «Проходка шахт и квершлагов» и «Крепление шахт и квершлагов».

Начиная с 1906 года им в специализированных научных изданиях, таких как «Записки Екатеринославского технического общества», «Известия Екатеринославского высшего горного училища», «Горнозаводской листок» и «Горный журнал», был опубликован целый ряд работ о расчёте рудничной крепи и горном давлении, которые принесли ему известность как учёного-горняка. Первое обоснование новых методологических приёмов даётся в его работе «О некоторых попытках применения математики к горному искусству». Также эти идеи получили воплощение в его диссертации, опубликованной под тем же названием в «Горном журнале» за 1909 г. Им была выдвинута оригинальная теория горного давления и впервые выведена формула для расчёта горного давления. В обобщенном виде эта теория дана им в труде «Давление горных пород и рудничное крепление» (1930). Предложенная М.М. Протодяконовым шкала коэффициента крепости горных пород явилась первым реальным способом для оценки горных пород по их буримости, взрываемости, зарубаемости и т. п.

Основные научные труды профессора М. М. Протодяконова посвящены проблемам давления горных пород, крепления горных выработок, рудничной вентиляции и технического нормирования в горной промышленности. Труды профессора М.М. Протодяконова в области рудничного проветривания были использованы при разработке правил техники безопасности в горной промышленности. Им также создана методология нормирования горных работ.

В 1913 г. опубликовал обширную монографию профессор Гольдрейх [86]. В основу этой работы он частично положил результаты исследований Ичинского, а частично свои собственные исследования поведения железных дорог в местах подработки подземными выработками. Гольдрейх пришел к заключению, что в породах каменноугольного возраста направление трещин изломов согласуется с теорией Ичинского, а в породах третичных направление

трещин изломов существенно отличается от правила Ичинского. Гольдрейх указывает, что оседание поверхности протекает тем более плавно, чем больше толща третичных отложений. В каменноугольных породах сдвигение происходит по направлению, которые не противоречит правилу Ичинского. В третичных породах величина углов, ограничивающих область сдвижений, существенно зависит от механических свойств этих пород: от степени связности пород, насыщенности водой и др.

В начале 19-ого столетия вопросам сдвижения горных пород значительную часть своих трудов посвятил профессор П.М. Леонтовский. В работе [46] он дал обстоятельный обзор изученности сдвижения горных пород. Обзор показал весьма слабую изученность вопроса, которая имела место не только в 1912 г., но и значительно позже. Петр Михайлович предпринял попытку обосновать выбор углов сдвижения для расчета охранных целиков. В 1923 г. издаются «Временные правила оставления предохранительных целиков под охраняемыми зданиями на рудниках Донбасса» разработанные при участии профессора П.М. Леонтовского. Но уже в 1927 г. эти правила были переработаны профессором И.М. Бахуринным, которые с некоторыми изменениями и дополнениями применялись вплоть до 1939г. Как оказалось впоследствии Правила 1923-1927 гг. далеко не отвечали своему назначению. Это было связано, прежде всего с тем, что данные правила не были подкреплены данными фактических наблюдений.

В 1925-1926 гг. А.Н. Динник [18] предложил использовать теорию упругости для описания напряженно-деформированного состояния горных массивов и сформулировал решение задачи теории упругости для тяжелого полупространства в предположении равенства нулю горизонтальных деформаций. Отсюда появилось понятие исходного бокового давления, отличного от нуля, а отношение этого давления к вертикальному горному давлению получило название коэффициента исходного бокового давления.

Таким образом, в 1920—1930-х годах прошлого столетия впервые при решении проблем горного давления стали использоваться исходные понятия об упругих средах, закон Гука и уравнения равновесия. При этом заметим, что к этому времени уже была разработана теория упругости, которая наряду с сопротивлением материалов широко использовалась в мостостроении, машиностроении и других отраслях науки и техники.

В этот период А.Н. Динник совместно с Г.Н. Савиным и А.Б. Моргаевским [19] успешно развивают идею использования в горном деле методов решения задач теории упругости. Они впервые детально описали распределение напряжений вокруг горизонтальных выработок круглого, эллиптического и прямоугольного сечений в скальных породах. В те же годы чилийский геолог Р. Феннер [84], как и А.Н. Динник, предложил считать горный массив линейно-упругим вне приконтурной зоны горной выработки. Ограничиваясь описанием напряженного состояния горных пород вокруг выработки круглого сечения, он выделяет зону пониженных напряжений с существенным смещением горных пород в выработку (зона Тромпетера), зону повышенных напряжений с разрывами породы и остальную часть массива, в котором с удалением от выработки, ее влияние на напряженное состояние горных пород затухает. Р. Феннер обратил внимание на необходимость учета пластичности горных пород, неоднородности, слоистости, рельефа местности при изучении напряжений и смещений.

В середине 1930-х годов профессор Д.С. Ростовцев [67] первым выдвинул гипотезу горного давления в очистных выработках, которая была положена в основу управления кровлей в лавах (Донбасс). Суть ее в том, что когда подработанная на больших площадях кровля зависает, в краевых частях возникает опасная концентрация напряжений и может произойти обрушение основной кровли (вторичная осадка). При достаточно мощной непосредственной кровле и подбучивании ее вторичная осадка не оказывает существенного влияния на призабойную крепь. В 30-е годы академик Л.Д.

Шевяков [80] предложил метод расчета целиков при камерно-столбовой системе разработки. Суть метода состоит в том, что на каждый целик давит вес столба пород до поверхности. Площадь сечения этого столба равна сумме площади самого целика и половины площади потолочин камер, примыкающих к целику. Такой подход к учету целиков был достаточно обоснован Г.Н. Кузнецовым и М.А. Слободовым [40] применительно к пластовым месторождениям соли путем измерений напряжений методом разгрузки, который был предложен Д.Д. Головачевым [16] в 1935 г. для исследования строительных конструкций.

Большие заслуги в развитие исследовательских работ принадлежат профессору И.М. Бахурину [7]. Под непосредственным его руководством, начиная с 1928 г., почти во всех крупных горнопромышленных районах СССР проводились многочисленные инструментальные наблюдения за сдвижением земной поверхности и пород в рудниках. И.М. Бахурин воспитал школу своих учеников и последователей, в течение длительного времени работавших по вопросам сдвижения горных пород (С.Г. Авершин [1; 2], М.В. Коротков [34], Д.А. Казаковский [25;26], Г.Н. Кузнецов [38; 39], П.Ф. Гертнер [15], О.Л. Кульбах [44], З.И. Поляк [55], И.А. Блашкевич [9], М.А. Кузнецов [3] и др.).

Наличие разнообразных геологических и горноэксплуатационных условий, а также непрерывное изменение этих условий по мере развития горных работ исключали возможность составления окончательных и исчерпывающих Правил охраны сооружений.

Правила охраны сооружений, разрабатывавшиеся для отдельных месторождений и бассейнов, отражали изученность вопросов сдвижения горных пород лишь на определенном этапе развития наблюдений.

Дальнейшие наблюдения и исследования углубляли представление о характере процесса сдвижений и вызывали необходимость уточнения и дополнения ранее составленных Правил.

С 1938 по 1998 гг. ВНИМИ и его филиалами были разработаны:

- 1) Правила охраны сооружений от вредного влияния горных разработок в Донбассе и Подмосковном бассейне (изданы в 1939г.);
- 2) Правила для Кузбасса (изданы в 1940 г.);
- 3) Проект Правил для шахт Воркутинского угольного месторождения (изданы 1946 г.);
- 4) Правила для Карагандинского бассейна (изданы в 1949 г.);
- 5) Изменения и дополнения к правилам 1939 г. для Донбасса (изданы в 1949 г.);
- 6) Правила для Челябинского буроугольного бассейна и Буланашского месторождения (изданы в 1950 г.)
- 7) Правила для Кизеловского бассейна (изданы в 1950 г.);
- 8) Правила для Черемховского угольного месторождения (изданы в 1951 г.);
- 9) Указания по охране сооружений от вредного влияния подземных разработок на угольных месторождениях Средней Азии (изданы в 1951 г.)
- 10) Указания по охране сооружений от вредного влияния подземных разработок на угольных месторождениях Приморскуголь и Хабаровскуголь (изданы в 1951 г.);
- 11) Указания по охране сооружений от вредного влияния подземных разработок на угольных и сланцевых месторождениях с неизученным характером сдвижения горных пород (изданы в 1951 г.).
- 12) Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на угольных месторождениях (изданы в 1981 г.)
- 13) Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на угольных месторождениях (изданы в 1998 г.)

Приведенный перечень Правил и Указаний свидетельствует об исключительно больших масштабах и значительных результатах инструментальных наблюдений, проведенных в ряде горнопромышленных районов страны.

Инструментальные наблюдения, проведенные в период с 1928 по 1935 гг., позволили осветить ряд неизученных вопросов сдвижения горных пород и предпринять первые попытки создания методов предрасчета сдвижений. Работы в этом направлении были начаты профессором С.Г. Авершиным [1] в 1935-1936 гг.

В конце 1930-х годов С.Г. Авершин [2] предложил способ расчета сдвижения земной поверхности на основе результатов натурных измерений. Попытка положить в основу теории сдвижения горных пород общие свойства сплошной среды и математический аппарат теории упругости и пластичности не привели к созданию чисто теоретических приемов количественной характеристики процесса сдвижения. В силу этого на современном этапе предрасчет сдвижений пришлось основывать, главным образом, на закономерностях и величинах, выявленных в процессе инструментальных наблюдений. Для этой же цели частично использовались результаты наблюдений на моделях.

Одновременно с методом предрасчета разрабатывался и совершенствовался метод аналогий. С этой целью в 1947-1948 гг. бригадой сотрудников под руководством Д.А. Казаковского было произведено обобщение материалов наблюдений по различным угольным месторождениям и бассейнам.

В результате проведенных работ Д.А. Казаковским была предложена классификация угольных месторождений [25], являющаяся основой метода аналогий. Эта классификация была использована для составления Указаний по охране сооружений от вредного влияния горных разработок на месторождениях с неизученным характером сдвижения горных пород.

Классификация Д.А. Казаковского приспособлена главным образом к выбору углов сдвига для расчета охранных целиков. В соответствии с этим в основу классификации положена однотипность месторождений по углам сдвига в коренных породах. При анализе зависимости углов сдвига от геологических и горноэксплуатационных условий Дмитрий Антонович выявил определяющую роль физико-механических свойств горных пород. Таким образом, физико-механические свойства горных пород (крепость, степень сцементированности и т.д.) были положены в основу классификации как один из определяющих признаков. Что в свою очередь не совсем верно, поскольку практика горного дела показала, что для блочно-слоистого массива горных пород, каким является этот массив на большинстве месторождений, являются структура и строение массива, которые в классификации Д.А. Казаковского не учитываются.

Еще одним недостатком является то, что классификация базируется на одном показателе – прочности пород, в то время как геомеханическое состояние массива определяется, прежде всего, отношением нагрузки на горную породу к ее прочности. При одной и той же прочности пород это отношение, в зависимости от глубины, может меняться в несколько раз, что необходимо учитывать, особенно при современных глубинах разработки месторождений полезных ископаемых

Углы сдвига, приведенные в данной классификации, были обоснованы наблюдениями на типичных месторождениях и для существующих глубин того времени. Тогда как сейчас глубины разработки месторождений значительно увеличились.

Отметим, что наряду с началом развития натуральных инструментальных наблюдений, связанных с горным давлением и сдвижением горных пород, а также началом развития теории горного давления с использованием методов теорий упругости и сопротивления материалов, были широко развернуты лабораторные исследования деформационно-прочностных свойств горных

пород с учетом основного минералогического состава, степени метаморфизма, трещиноватости, влажности, выветриваемости.

В 1940-е годы получили широкое развитие натурные наблюдения за движением горных пород при разработке пологих, наклонных и крутопадающих пластов. В 1948 г. были начаты исследования горного давления на моделях из эквивалентных материалов. Основные положения метода моделирования были разработаны Г.Н. Кузнецовым [39]. Позднее им была выдвинута гипотеза шарнирно-блочного механизма оседания основной кровли очистных выработок. В этот же период для измерения деформаций и напряжений в натуральных условиях стали использоваться тензометрические датчики, в частности, при измерении деформаций на торце обуреваемого керна, динамометры, струнные датчики. Были разработаны первые геофоны для сейсмоакустической оценки напряженного состояния горных пород.

Исходя из гипотезы консольных балок, профессор В.Д. Слесарев [70] предложил ряд формул для расчета предельных пролетов кровли на трех стадиях ее обнажения и формулы расчета давления на крепь очистного забоя. На первой стадии предельного пролета используется изгиб балки с "внецентренным" сжатием, свободно опертой или защемленной по концам, на второй стадии предельный пролет определяется максимумом прогиба балки без разрыва в нижней части, третье предельное состояние - трещина разрыва прорастает на всю толщину балки.

В отличие от гипотез Г.Н. Кузнецова и В.Д. Слесарева профессор П.М. Цимбаревич [79] сформулировал гипотезу сдвига блоков или гипотезу сдвига призм обрушения слабых пород для очистных выработок на сравнительно небольшой глубине.

За рубежом в 1947-1951 гг. бельгийский ученый А. Лабасс [89], следуя Р. Феннеру, сформулировал применительно к очистным выработкам свою гипотезу "предельного растрескивания" согласно которой, непосредственная и частично основная кровля при переходе из зоны опорного давления в зону

разгрузки по мере перемещения забоя подвергается интенсивному растрескиванию. Это связано с большой разницей между главными напряжениями. Он предлагает использовать для поддержания кровли податливую крепь, но с весьма высоким сопротивлением, чтобы непосредственно уменьшить расслоение кровли.

К этому времени относится основополагающая работа В.В. Соколовского "Плоское предельное равновесие горных пород". Эта и последующие его работы по механике сыпучих сред и теории пластичности [72] сыграли весьма большую роль при решении проблем устойчивости бортов и уступов карьеров. Используя эти работы, Г.Л. Фисенко в 1950-1970-х годах предложил ряд расчетных методов, которые стали широко использоваться при открытой разработке месторождений [77;78].

Значительное влияние на развитие аналитических методов в геомеханике применительно к горным проблемам оказали работы Д.И. Шермана [81], С.Г. Михлина [49], С.Г. Лехницкого [47]. Схематизируя горные выработки эллиптическими и щелевыми вырезами, они дают точные решения поставленных задач, что позволяет провести детальный анализ полей напряжений в идеализированной постановке задачи. Д.И. Шерман разработал метод расчета напряжений около двух сближенных эллиптических выработок большой протяженности на достаточно большой глубине.

И.В. Родин [65] и Г.Н. Савин [69] положили начало использованию аналитических методов в решении задач о взаимодействии крепи с породами горной выработки кругового сечения. Крепь рассматривается как упругое кольцо, вставленное в круговой вырез. Из решения этой контактной задачи Г.Н. Савин получает расчетные формулы давления на крепь. Позднее этот вопрос с учетом упругопластических деформаций применительно к вертикальному стволу с крепью рассмотрел профессор Ф.А. Белаенко [8]. В дальнейшем развитие этих методов с широким использованием в горной практике связано со многими учеными и в первую очередь с Н.С. Булычевым и Н.Н. Фотиевой [11].

М.А. Иофисом [13] внесен большой вклад в изучении областей и зон сдвижения горных пород над и под очистными выработками. В частности, им было доказано, что под влиянием горных работ в слоистом массиве горных пород образуется несколько зон, отличающихся по характеру и степени деформирования пород. Количество этих зон зависит от горно-геологического и горно-технических условий разработки месторождения, сложности решаемых задач, степени изученности деформационных процессов и других факторов. М.А. Иофис выделяет в массиве три области и 16 зон (в условиях крутых пластов 17 зон), имеющих свои, только им присущие особенности.

На всех этапах своего развития геомеханика и маркшейдерия получали мощные импульсы со стороны органов, контролирующих состояние безопасности горных работ и жизнедеятельности населения.

Подобного рода проблемы возникли еще в средние века, когда при добыче полезных ископаемых приходилось определять устойчивость пространств, образующихся в результате их извлечения из недр, и вести горные работы с учетом близости ранее выработанных участков и горизонтов, под зданиями, сооружениями и водоемами, вблизи шахтных стволов и шурфов и т.д. Вначале многое решалось на основе передаваемого из поколения в поколение практического опыта рудокопов, предполагающего главным образом визуальные наблюдения за поведением горных пород и развитую интуицию.

Однако со временем этого оказалось недостаточно. Так, еще в первой половине XIX в. в Бельгии и Франции возникла острая полемика между горной инспекцией и рудничными инженерами после того, как во многих домах в районе горных работ в пригороде Льежа появились громадные трещины. Позднее, в середине 50-х годов того же столетия, подобная угрожающая ситуация сложилась и в некоторых горно-промышленных городах Германии. Для предотвращения конфликтов правительства разных стран были вынуждены издавать постановления, регламентирующие процессы извлечения полезных ископаемых из недр.

В нашей стране изучение сдвижения горных пород на плановой основе, как важный элемент управления горными работами, началось практически только в 30-е годы двадцатого столетия. Первые систематические инструментальные наблюдения организовал профессор И.М. Бахурин в 1929 г. Для проведения и анализа этих наблюдений были созданы два отряда, которые объединились в 1932 г. в Центральное научно-исследовательское маркшейдерское бюро (ЦНИМБ), преобразованное позже (в послевоенные годы) во Всесоюзный научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела (ВНИМИ). Наблюдения вели на единой методической основе и с каждым годом их совершенствовали и расширяли. В настоящее время они проводятся почти во всех угольных и горнорудных бассейнах страны.

В 1939 г. Государственной главной горно-технической инспекцией были утверждены "Правила охраны сооружений от вредного влияния подземных горных разработок в Донецком и Подмосковном угольных бассейнах", составленные полностью на основе непосредственных наблюдений. В этих Правилах все сооружения и природные объекты по степени их значения и характеру последствий, вызываемых их деформацией, разделяются на три категории охраны в Донецком бассейне и две категории - в Подмосковном. Углы сдвижения в Донбассе задаются в зависимости от угла падения пластов. В Подмосковном бассейне - в зависимости от категории охраны объектов.

В 1949 г. выпущены «Изменения и дополнения» к Правилам, в которых нашли отражение результаты исследований по определению допустимых деформаций для основных видов существовавших тогда зданий и сооружений.

В 1960 г. разработаны и изданы новые Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок в Донецком угольном бассейне", при составлении которых использован весь материал, накопленный в то время исследовательскими работами ВНИМИ, и богатейший

производственный опыт выемки угля под различными сооружениями, а также учтен опыт практического использования ранее действовавших Правил. Согласно этим Правилам, меры охраны сооружений и природных объектов принимают в зависимости от категории их охраны, конструктивных особенностей, протяженности, высоты, характера эксплуатации объектов, глубины, мощности и угла падения пласта. При этом все сооружения и объекты делят на семь категорий охраны и для каждой из них устанавливается своя безопасная глубина. Под безопасной глубиной понимается такая глубина, при которой и ниже горные разработки не могут вызвать в подрабатываемых объектах разрушительных деформаций, влекущих за собой прекращение эксплуатации, опасность для жизни работающих и живущих в охраняемых зданиях и сооружениях.

Аналогичные нормативные документы были составлены в этот период и для других бассейнов и месторождений. В этих документах безопасную глубину разработки устанавливали только для одного пласта. Вопрос определения условий ведения горных работ под сооружениями и природными объектами в свите пластов оставался в то время нерешенным. Поэтому основное внимание при проведении дальнейших исследований уделялось изучению влияния на подрабатываемые территории горных работ в свите пластов. Для установления закономерностей накопления (суммирования) деформаций при отработке нескольких пластов во всех угольных бассейнах страны по специальной методике были заложены долговременные наблюдательные станции и проведены высокоточные инструментальные наблюдения. По результатам этих наблюдений была разработана методика расчета деформаций земной поверхности, по ней изучали взаимосвязь деформаций грунта с подрабатываемыми объектами и устанавливали значения допустимых деформаций для различных категорий сооружений.

На основании проведенных исследований впервые в мире были составлены бассейновые Правила охраны сооружений, основанные не на эмпирических зависимостях, а на строгих инженерных методах расчета.

В течение 10 лет (1969-1981 гг.) интенсивную отработку запасов под застроенными территориями и природными объектами проводили по нормам новых Правил, построенных на современных прогрессивных принципах. Особенно большой опыт подработки различных объектов накоплен в Донецком бассейне, где за это время извлечено под зданиями, сооружениями и водоемами около 500 млн. т. угля и изучено влияние горных работ на нескольких десятках тысяч объектов. Такая широкая апробация в промышленных условиях новых технических решений была проведена впервые в мире.

В 1981 г. ставится вопрос о создании единых Правил охраны сооружений для всех угольных и сланцевых месторождений. Реальность и практическая целесообразность этого предложения вполне очевидны. Имеющиеся в то время многочисленные фактические данные позволили все месторождения объединить в ряд типов по признаку проявления сдвижений, применительно к которым и могут быть заданы интересующие нас параметры сдвижения горных пород.

В 1998 г. международным научным центром ВНИМИ были разработаны Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на угольных месторождениях. Данные Правила базировались на результатах наблюдений, обобщения опыта ведения горных работ под зданиями, сооружениями и природными объектами, лабораторных и аналитических исследований процесса сдвижения горных пород и земной поверхности. На сегодняшний день данные правила используются горными предприятиями, проектными и научно-исследовательскими организациями угольной промышленности.

Накопленный опыт показал, что нормы, способы и принципы, заложенные в бассейновых Правилах, в основном себя оправдали, их можно использовать

при составлении Правил, единых для всех бассейнов. Обобщение результатов исследований позволило составить такие Правила и в декабре 1979 г. утвердить их в Минуглепроме СССР и в Госгортехнадзоре СССР. Но в данных Правилах охраны очень в узком диапазоне рассмотрены правила для месторождений с неизученным или недостаточно изученным характером сдвижения. Таким образом, данный вопрос является очень актуальным на сегодняшний день и требует детального изучения.

Подводя итог всему выше сказанному, можно сделать заключение, что природа геомеханических процессов, протекающих в массивах пород при разработке месторождений полезных ископаемых, достаточно давно изучается в нашей стране и за рубежом. К настоящему времени получены существенные результаты, позволяющие говорить о принципиальных механизмах и параметрах геомеханических явлений, происходящих в массиве пород. Также накоплен огромный опыт проведения горных работ в самых разнообразных горно-геологических условиях. В результате полученных данных было разработано большое количество различных нормативных документов, как имеющих статус государственных документов, так и различного ведомственного уровня. Использование этих документов позволяют решать вопросы регулирования состояния массива пород.

При этом основными методами защиты объектов от вредного влияния горных разработок в этих «Правилах...», как и в предыдущих документах, оставались предохранительные целики различного назначения. Однако, в современных условиях эта мера охраны совершенно недопустима, так как размеры целиков растут пропорционально квадрату глубины горных работ, при этом стоимость каждой тонны вскрытых и подготовленных к выемке запасов полезного ископаемого, оставляемых в целике, также увеличивается. Результатом является резкое повышение себестоимости добытого сырья.

Всё это говорит о том, что принятые в настоящее время методические подходы и нормативные документы зачастую приводят к техническим

решениям, неадекватным конкретным горно-геологическим условиям. Это происходит вследствие недостаточного учёта основных особенностей массивов, а именно их строения, состояния.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Развитие методов оценки механических характеристик массивов осадочных пород на месторождениях с неизученным характером процесса сдвижения, включающих разработку классификаций критериев подобия месторождений, с учетом современных условий их освоения, является важной и актуальной задачей, поскольку все чаще приходится вовлекать в добычу месторождения, залегающие на больших глубинах и в сложных, недостаточно изученных, а иногда и совсем неизученных условиях.

2. Анализ современного состояния и изученности проблемы показал, что большинство классификаций и способов, на которых базировались Правила охраны сооружений от вредного влияния горных разработок, имеют ряд недостатков, которые заключаются в том, что:

- а) большинство классификаций и способов составлены более полувека тому назад и сильно устарели.
- б) способ определения угла сдвижения составлялся в период, когда горные работы велись на малых глубинах, и основной мерой охраны подрабатываемых объектов было оставление предохранительных целиков, которая в настоящее время не допустима.
- в) способ определения угла сдвижения базируется на одном показателе – крепости пород, в то время как геомеханическое состояние массива определяется, прежде всего, отношением нагрузки на горную породу к ее прочности.

Из всего вышесказанного, вытекают следующие основные задачи, которые необходимо решить:

1. Установить критерии подобия месторождений и составить их классификацию.

2. Определить показатели, характеризующие состояние и строение массива горных пород.

3. Установить зависимость угловых параметров сдвига горных пород от основных влияющих факторов.

4. Определить условия образования провалов на месторождениях-аналогах и разработать методы установления местоположения полостей в толще горных пород, вызывающих эти провалы.

## **2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ С НЕИЗУЧЕННЫМ ХАРАКТЕРОМ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ**

Угловые параметры являются важнейшими характеристиками процесса сдвижения. От точности их определения во многом зависит правильность выбора мер охраны объектов и сооружений, находящихся на земной поверхности, от вредного влияния горных разработок. Величины граничных углов и углов полных сдвижений определяют размеры полумульды, а следовательно, величины и распределение расчетных деформаций в мульде. По углам сдвижения, определяющим границу зоны опасных деформаций, строятся предохранительные целики под сооружениями на земной поверхности [13]. Названные угловые параметры широко используются в качестве исходных во многих методиках, применяемых для оценки геомеханического состояния горных пород и горных выработок на угольных месторождениях. [25].

В соответствии с этим, погрешности определения названных углов могут привести либо к неоправданно завышенным потерям в предохранительных целиках, либо к недооценке вредного влияния горных разработок на охраняемые объекты, как на поверхности, так и в подрабатываемом массиве горных пород.

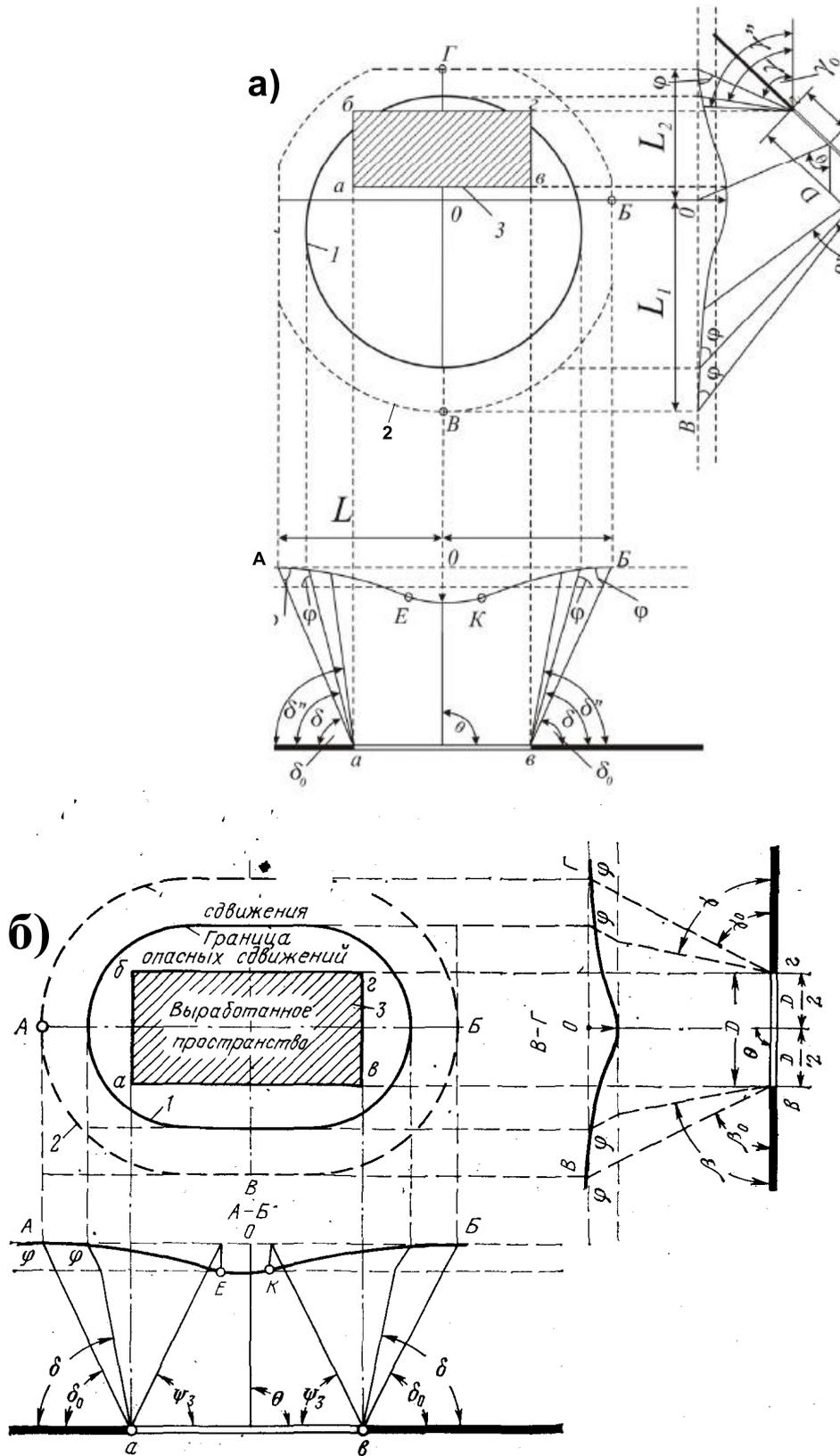
Исследованию угловых параметров процесса сдвижения земной поверхности посвящены работы многих ученых. Этот факт является подтверждением актуальности поставленной задачи. Наиболее известны исследования Д.А. Казаковского, Р.А. Муллера, Н.Ф. Шалагинова, М.А. Иофиса, С.П. Колбенкова, А.В.Онищенко, А.Н. Медянцева, В.А. Назаренко и др. В частности, Д.А. Казаковский [25; 26] установил зависимость углов сдвижений от глубины горных работ, А.Н. Медянцев и М.А. Иофис на основании анализа результатов наблюдений [22] на 60 наблюдательных станциях доказали зависимость углов сдвижения от вынимаемой мощности и глубины горных работ. А.В. Онищенко и В.А. Назаренко установили значения угловых параметров

для условий шахт Западного Донбасса. Общий анализ публикаций по вопросам определения границ мульды сдвижения указывает на отсутствие единого мнения среди исследователей о зависимости угловых параметров от горно-геологических условий разработки месторождений. В связи с этим нами поставлена задача, уточнить угловые параметры процесса сдвижения горных пород и земной поверхности.

## **2.1 Основные понятия и угловые параметры процесса сдвижения горных пород и земной поверхности**

Процесс сдвижения толщи горных пород и земной поверхности характеризуется следующими параметрами: размерами и формой мульды сдвижения; величиной углов граничных, сдвижения, разрывов, полной подработки; величинами векторов сдвижения, их составляющих (оседания и горизонтального сдвижения), деформациями в мульде сдвижения; общей продолжительностью процесса сдвижения, его отдельных стадий и скоростью оседаний [13].

Мульда сдвижения. При выемке части пласта «абгв» на значительной глубине (рис. 2.1, а) процесс сдвижения толщи горных пород достигает земной поверхности, вызывая ее сдвижения и деформацию. Часть земной поверхности «АГБВ», подвергшаяся сдвижениям и деформациям, называется мульдой сдвижения. В мульде сдвижения принято выделить два главных сечения, проходящих через точку максимального оседания по простиранию (линия АБ) и вкрест простирания пласта (линия ВГ). В этих сечениях параметры процесса сдвижения после его затухания достигают максимальных значений, а векторы смещения точек мульды и их составляющие примерно совпадают с этими плоскостями.



**Рис. 2.1** Мульда сдвижения и ее разрезы:

а – при выемке наклонного пласта; б – при выемке горизонтального пласта; 1 – граница опасных сдвижений; 2 – граница мульды сдвижения; 3 – выработанная площадь

В плавной мульде сдвижения различают ее края (АЕ и БК) и дно КЕ. Мульда сдвижения может иметь как вогнутое дно КЕ (рис. 2.1, а), так и плоское ЕК (рис. 2.1, б).

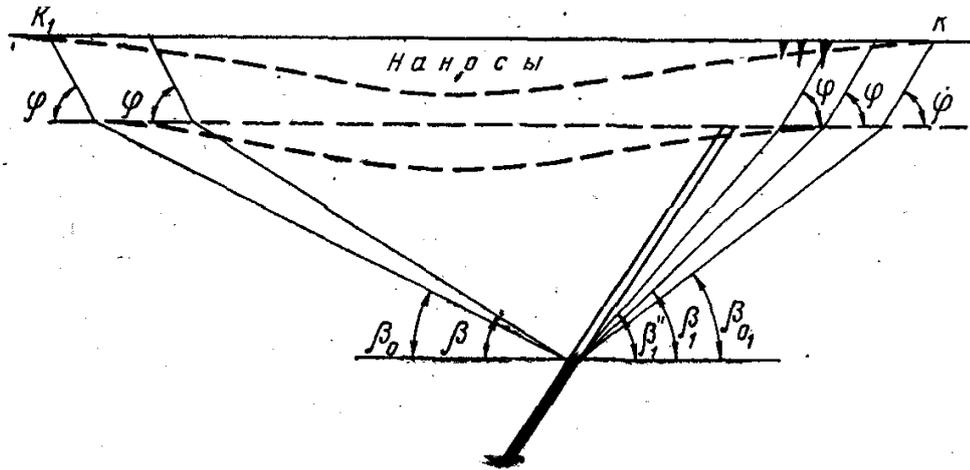
Если размеры выработанного пространства на разрезах по простиранию или по падению пласта значительно превышают глубину разработки, то мульда сдвижения имеет плоское дно. Такой случай подработки принято называть полной подработкой.

Форма и размеры мульды сдвижения, а также ее расположение относительно выработанного пространства зависят от мощности пласта, угла наклона пласта, размеров выработанного пространства и глубины его залегания.

Остановимся подробнее на угловых параметрах процесса сдвижения горных пород и земной поверхности. К угловым параметрам процесса сдвижения относятся:

- углы сдвижения;
- граничные углы;
- углы разрывов;
- углы полных сдвижений;
- угол максимального оседания.

Граничные углы  $\beta_0$ ,  $\beta_{01}$ ,  $\gamma_0$  и  $\delta_0$  – это внешние относительно выработанного пространства углы на вертикальных разрезах по главным сечениям мульды сдвижения, образованные горизонтальными линиями и линиями, соединяющими границы выработанного пространства с граничными точками мульды сдвижения. Граничными точками мульды сдвижения принимаются точки, за пределами которых в сторону неотработанной части пласта растяжения и наклоны не превышают величины  $0,4 \cdot 10^{-3}$  [13].



**Рис. 2.2** Схема расположения угловых параметров при крутом падении пласта.

С помощью граничных углов  $\beta_0$ ,  $\gamma_0$  определяют размеры мульды сдвига на разрезе по падению пласта, а с помощью угла  $\delta_0$  – по простиранию пласта (рис. 2.1, а). Угол  $\beta_0$  ограничивает зону сдвига у нижней границы выработанного пространства в породах кровли, угол  $\beta_{01}$  – у нижней границы, но в породах почвы при крутом падении (рис. 2.2), угол  $\gamma_0$  – у верхней границы выработанного пространства. Граничные углы используются также при построении целиков под глубокие вертикальные стволы.

В мульде сдвига принято выделять зону опасных сдвижений. На разрезе вкрест простирания опасную зону сдвига выделяют с помощью углов сдвига  $\beta$ ,  $\beta_1$  и  $\gamma$ , на разрезе по простиранию – с помощью угла  $\delta$ .

Углы сдвига  $\beta$ ,  $\beta_1$ ,  $\gamma$  и  $\delta$  – внешние относительно выработанного пространства углы, образованные горизонтальными линиями и линиями, соединяющими границы выработки с точками мульды сдвига, за пределами которых (в сторону неотработанных частей пласта) величины деформаций не достигают опасных для ответственных зданий. Опасными, или критическими, величинами деформаций принято считать: для наклонов  $4 \cdot 10^{-3}$ , растяжений (сжатий)  $2 \cdot 10^{-3}$ , кривизны  $0,2 \cdot 10^{-3}$  1/м [23; 24].

Углы сдвига при построениях отсчитывают от горизонтальной линии со стороны неотработанной части пласта в сторону выработанного

пространства; и откладывают:  $\beta$  – у нижней границы очистной выемки в породах кровли пласта,  $\beta_1$  – у нижней границы очистной выработки в породах почвы пласта в условиях крутого падения, когда  $\alpha > \alpha_{\text{п}}$  (где  $\alpha_{\text{п}}$  – предельное значение угла наклона  $\alpha$ , при котором возникает сползание пород почвы пласта),  $\gamma$  – у верхней границы очистной выемки и  $\delta$  – по простиранию пласта. Углы сдвижения используются также для построения предохранительных целиков. Угол  $\delta$  является интегральным показателем прочностных свойств горных пород, строения и состояния массива горных пород. Поэтому многими исследователями используется для классификации месторождений с неизученным характером процесса сдвижения, в том числе для классификации Д.А. Казаковского.

Значения граничных углов и углов сдвижения зависят от свойств горных пород и определяются опытным путем. При отсутствии опытных данных значения граничных углов и углов сдвижения определяются по табл. 2.1. Углы разрывов принимаются на  $10^\circ$  круче углов сдвижения при  $f \leq 1,5$  и на  $5^\circ$  круче при  $f > 1,5$ .

Таблица 2.1

**Значения граничных углов  $\delta_0$  и углов сдвижения  $\delta$  в зависимости от коэффициентов крепости пород  $f$**

| Значения коэффициента $f$ |                  | Значения углов, град |          |
|---------------------------|------------------|----------------------|----------|
| Среднее                   | Предел изменения | $\delta_0$           | $\delta$ |
| 0,1                       | До 0,3           | 40                   | 45       |
| 0,5                       | 0,3-0,7          | 45                   | 55       |
| 1,0                       | 0,7-1,2          | 50                   | 60       |
| 1,5                       | 1,2-2,0          | 55                   | 65       |
| 2,5                       | 2,0-3,5          | 60                   | 70       |
| 4,0                       | 3,5-4,5          | 65                   | 75       |
| 5,0                       | 4,5-6,0          | 70                   | 80       |

При незначительных глубинах горных пород, большой мощности вынимаемых пластов крутого залегания в мульде сдвижения образуются провалы, террасы, трещины, составляющие зону обрушения. Границы зоны обрушения определяются с помощью углов разрывов  $\beta''$ ,  $\beta_1''$ ,  $\gamma''$  и  $\delta''$ . Углы разрывов, так же как и углы сдвижения, – внешние относительно выработанного пространства углы, образованные горизонтальными линиями и линиями, соединяющими границы очистной выработки на разрезах вкrest простирания и по простиранию пласта с крайними трещинами на краях мульды сдвижения.

Углы разрывов строят у границ выработок аналогично построению углов сдвижения. Углы разрывов используют также для построения предохранительных целиков под водоемы.

Кроме перечисленных трех углов (граничных, сдвижения и разрывов) для определения местоположения характерных точек в главных сечениях мульды пользуются еще углами  $\theta$ ,  $\psi_1$ ,  $\psi_2$ ,  $\psi_3$ . Угол  $\theta$  определяет на разрезах при неполной подработке земной поверхности точку в мульде с максимальным оседанием. На рис. 2.1, (а), (б) показано получение таких точек по главным сечениям мульды, для чего из середины очистных выработок отложены величины углов  $\theta$  от линии горизонта (на разрезе вкrest простирания со стороны падения пласта) и проведены линии до пересечения с линией земной поверхности – точки «о».

$\psi_1$ ,  $\psi_2$ ,  $\psi_3$  – углы полной подработки (полных сдвижений) – это внутренние относительно выработанного пространства углы, образованные линиями, соединяющими границы плоского дна мульды с границами очистной выработки и плоскостью пласта в главных сечениях мульды. С помощью углов  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  определяют размер плоского дна мульды на разрезе по падению пласта. При этом угол  $\psi_1$  откладывается у нижней границы очистной выработки,  $\psi_1$  – у верхней, а с помощью угла  $\psi_3$  – на разрезе по простиранию пласта. Если линии, проведенные под углами  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  на разрезе по падению и  $\psi_3$  на разрезе по

простирацию, пересекутся ниже земной поверхности, то в мульде будет отсутствовать плоское дно.

Величины рассмотренных нами углов, зависят главным образом от угла наклона пласта, физико-механических свойств горных пород и ранее проведенных горных работ (подработанности толщи). Значения угловых параметров для различных угольных бассейнов страны, полученные инструментальными наблюдениями, приводятся в «Правилах охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях» [58] и «Справочнике по маркшейдерскому делу». Но как было отмечено выше, на данное время не существует единого мнения среди исследователей о зависимости угловых параметров от горно-геологических условий разработки месторождений. В связи с этим нами поставлена задача уточнения угловых параметров процесса сдвижения горных пород и земной поверхности.

## **2.2 Определение величины угла сдвижения земной поверхности на месторождениях с неизученным характером процесса сдвижения**

Для современного этапа развития горнодобывающих отраслей промышленности характерно вовлечение в разработку месторождений со сложными горно-геологическими условиями, увеличение глубины и повышение интенсивности ведения горных работ на действующих рудниках. Возрастают масштабы воздействия горных работ на окружающую среду, увеличиваются размеры участков массива и земной поверхности, подверженных процессам сдвижения, в зоне подработки оказываются многие ответственные объекты [13]. Все это приводит к повышению актуальности проблем, связанных с охраной зданий и сооружений от вредного влияния горных выработок, прогнозом напряженно-деформированного состояния массивов горных пород, охраной зданий, инженерных сооружений и природных объектов от вредного влияния горных работ. Для месторождений с неизученными процессами сдвижения,

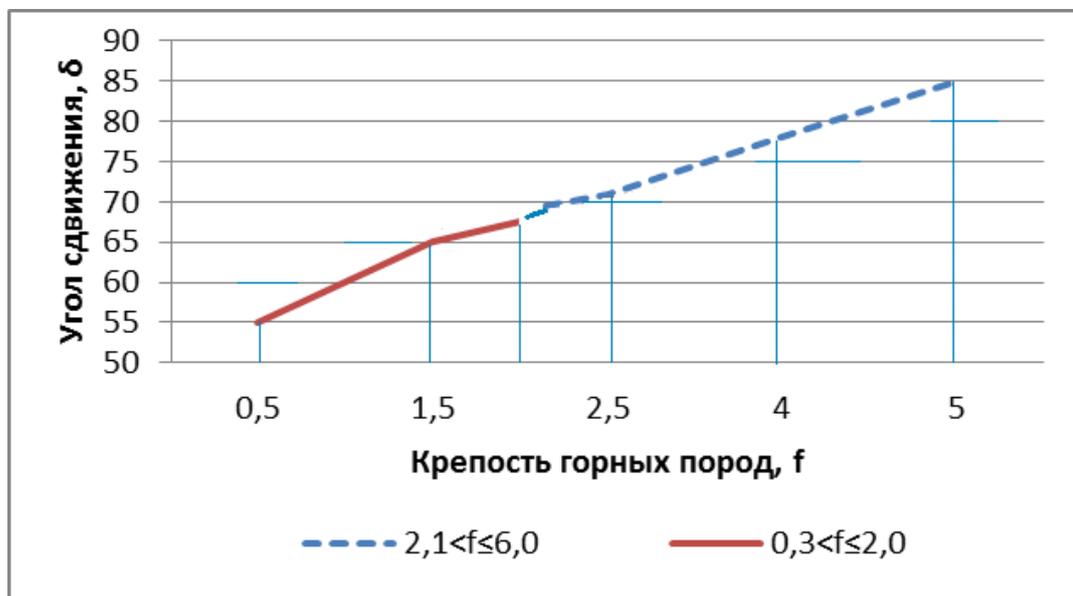
параметры процесса сдвижения, необходимые для определения зон опасного влияния подземных разработок, для выбора метода построения предохранительных целиков и для определения границ мульды сдвижения при расчете ожидаемых величин сдвижений и деформаций земной поверхности принимаются соответственно равными указанным параметрам на месторождении - аналоге.

Выбор месторождения - аналога производится на основании крепости пород, величины угла сдвижения  $\delta$  и общего геологического строения пород. Остановимся подробнее на определении угла сдвижения, поскольку в проблеме защиты сооружений от вредного влияния горных выработок углы сдвижения занимают важное место. Величины углов регламентируются правилами охраны сооружений, которые в настоящее время наиболее полно разработаны для угольных бассейнов страны. Но в большинстве правил не учитывается влияние на углы сдвижения таких важных факторов, как глубина горных работ, мощность пласта, структура, строение и состояние массива горных пород.

Глубина горных работ оказывает существенное влияние на деформации земной поверхности, характер и степень проявления горного давления в толще. С увеличением глубины разработки все виды деформаций земной поверхности уменьшаются. Особенно чувствительна к этому фактору кривизна сглаженной мульды сдвижения: она обратно пропорциональна квадрату глубины разработки. Горное давление, наоборот, с увеличением глубины разработки повышается, концентрация деформаций и напряжений на отдельных участках становится более опасной [3].

Механические свойства и структурные особенности горных пород оказывают влияние на все параметры и показатели процесса сдвижения. Наиболее тесная зависимость от этого фактора прослеживается в значениях углов сдвижения  $\delta$ , полученных при различных свойствах горных пород. На основании указанной зависимости проф. Д. А. Казаковский составил классификацию месторождений, используя прочностные свойства пород в качестве основного

определяющего признака [25]. Эта классификация представлена в табличной форме. Графически ее можно изобразить в виде, представленном на рис. 2.3



**Рис.2.3** Зависимость угла сдвига от прочности горных пород.

Данную зависимость (рис.2.3) аналитически можно аппроксимировать выражением вида:

$$\begin{cases} \delta = 50^\circ + 7,5^\circ f \\ \delta = 60^\circ + 3,5^\circ f \end{cases} \quad \text{при} \quad \begin{cases} 0,3 < f \leq 2,0 \\ 2,1 < f \leq 6,0 \end{cases} \quad (2.1)$$

где:  $f$  – коэффициент крепости по М.М. Протоodyяконову

$\delta$  – угол сдвижений, [°];

При детальном исследовании влияния различных факторов на угол сдвига, которые подробно были рассмотрены в [56; 33; 73; 5; 21; 74; 25; 22] было установлено, что на угол сдвига оказывают влияние такие факторы, как состояние массива горных пород, а именно геомеханическое состояние массива, которое определяется, прежде всего, отношением нагрузки на горную породу к ее прочности [73]. Вторым фактором, оказывающим влияние на угол сдвига, является размер очистной выработки, который учитывается через соотношение D/H [33; 72; 5; 21; 74 и др.]. И наконец, третьим фактором, оказывающим влияние

на угол сдвижения, который был исследован А.Н. Медянцевым и М.А. Иофисом в работе [22], является отношение глубины горных работ к мощности пласта. Все вышеперечисленные факторы использовались для определения угла сдвижения отдельно друг от друга, хотя каждый из них вносит определенный процент влияния на угол сдвижения и не может быть рассмотрен обособленно друг от друга. Остановимся, подробно на каждом из них.

Согласно Указаниям ...[75] при горизонтальном залегании обрабатываемых пластов угол сдвижения определяется в зависимости от степени нагружения междукамерных целиков, т.е. геомеханическое состояние массива определяется, прежде всего, отношением нагрузки на горную породу к ее прочности.

$$\frac{\gamma H}{\sigma_{сж}} \quad (2.2)$$

где:  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на одноосное сжатие, [т/м<sup>2</sup>];

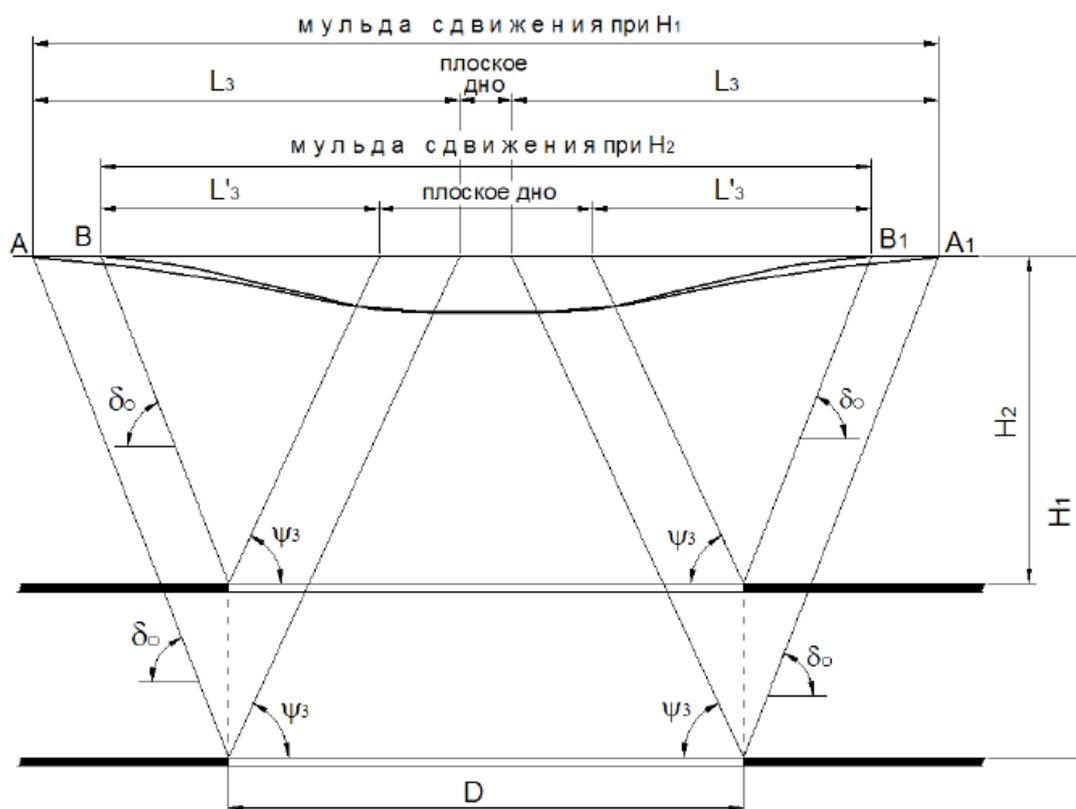
$\gamma$  – Объемный вес, [т/м<sup>3</sup>];

$H$  – глубина залегания горных пород, [м].

При одной и той же прочности пород это отношение, в зависимости от глубины, может меняться в несколько раз, что необходимо учитывать, особенно при современных глубинах разработки месторождений полезных ископаемых.

Глубина ведения очистных горных работ является одним из наиболее основных факторов, оказывающих влияние на процесс сдвижения земной поверхности. Она влияет на размеры мульды сдвижения, а так же на величины и распределение сдвижений и деформаций поверхности. На рис. 2.4 видно, что при полной подработке земной поверхности длины полумульды зависят от углов  $\delta_0$  и  $\psi_3$ .

$$L_3 = H_1 (\text{ctg}\delta_0 + \text{ctg}\psi_3); \quad (2.3)$$



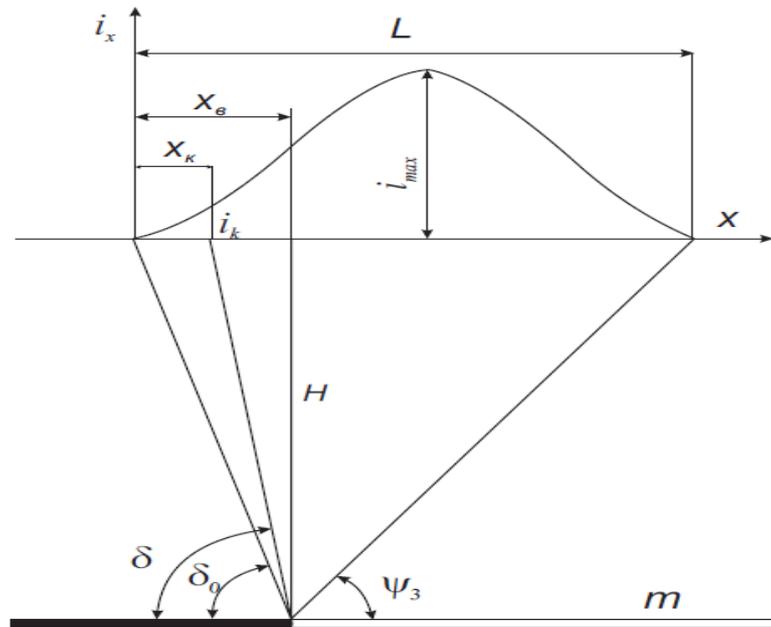
**Рис.2.4** Зависимость параметров мульды сдвижения от глубины при полной подработке земной поверхности.

Если принять величину  $(\text{ctg } \delta_0 + \text{ctg } \psi_3)$  постоянной, тогда очевидно, что длина полумульды  $L$  прямо пропорциональна, глубине разработки  $H$ . Размеры выработанного пространства оказывают влияние на величины и распределение сдвижений и деформаций в мульде. Влияние размеров очистной выработки учитывается через соотношение  $D/H$ . На существование такой зависимости указывают очень многие исследователи [33,72,5,21,74 и др.]. Более того, отношение  $D/H$  определяет величины оседаний земной поверхности и в нормативной методике [58].

Еще одним фактором, влияющим на угол сдвижения, является вынимаемая мощность пласта. Установлено, что максимальные значения оседания, деформаций и скоростей сдвижения находятся в прямой пропорциональной зависимости от вынимаемой мощности пласта (залежи). Угол сдвижения также

зависит от вынимаемой мощности, при увеличении вынимаемой мощности углы сдвижения несколько выполаживаются.

В работе [22] А.Н. Медянцевым и М.А. Иофисом выведена зависимость влияние на углы сдвижения таких важных факторов, как мощность пласта и глубина горных работ рис.2.5



**Рис. 2.5 График определения углов сдвижения по кривым наклонов мутьды сдвижения.**

В результате различных тригонометрических преобразований и анализа данных, полученных на 10 наблюдательных станциях в Донбассе, авторами была выведена эмпирическая зависимость для определения величин углов сдвижения  $\delta$

(2.4)

$$\delta = 65^\circ + 1,4^\circ \sqrt{\frac{H}{m}} \quad (2.4)$$

где:  $m$  – мощность пласта, [м];

$H$  – глубина залегания горных пород, [м].

Из данного выражения был сделан важный вывод, что углы сдвижения являются функцией отношения глубины горных работ к мощности пласта (кратности) и пропорциональны корню квадратному из этого соотношения.

В таблице 2.3 приведены углы сдвижения, полученные по данным натурных наблюдений на шестнадцати месторождениях [25; 26; 58].

В этой же таблице приведены значения углов сдвижения определенных по способу Д.А. Казаковского.

**Таблица 2.2**

|                | $\delta, ^\circ$ | Бсж,<br>т/м <sup>2</sup> | $\gamma,$<br>т/м <sup>3</sup> | m,<br>м | H,<br>м | D,<br>м | $f^{0,5}$ | $(\sigma/\gamma H)^{0,5}$ | $(D/H)^{0,5}$ | $(H/m)^{0,5}$ |
|----------------|------------------|--------------------------|-------------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------------------------|---------------|---------------|
| Донецкий       | 80               | 5600                     | 1,4                           | 1       | 285     | 220     | 2,4       | 3,7                       | 0,9           | 16,9          |
| Кузнецкий      | 70               | 3100                     | 2,5                           | 2,2     | 100     | 100     | 1,8       | 3,5                       | 1,0           | 6,7           |
| Карагандинский | 72               | 2800                     | 2,7                           | 1,3     | 60      | 200     | 1,7       | 4,2                       | 1,8           | 6,8           |
| Кизеловский    | 82               | 5200                     | 1,6                           | 1       | 56      | 72      | 2,3       | 7,6                       | 1,1           | 7,5           |

Проведенные исследования указывают, что полученная зависимость (2.1) по составленной классификации Д.А. Казаковского, является частным случаем определения угла сдвижения для глубин, изменяющихся в диапазоне от 100 до 350 м. В то время как, глубина подработки месторождения значительно превышает выше приведенные пределы и порою достигает 1000 м.. Несоответствие угловых параметров, определенным по способу Д.А. Казаковского с фактическими величинами углов сдвижения, наиболее отчетливо проявляется при больших глубинах разработки угольных пластов. Этот факт вызвал необходимость оценки способа, применявшегося для определения углов сдвижения по способу Д.А. Казаковского, на основании которого составлены современные «Правила ...» [58].

Таблица 2.3

| №<br>п/п | Наименование месторождения                  | Угол сдвига, $\delta$  |                              |                                | $\Delta\delta = \delta_{н.н.} - \delta_{в.з}$ | $\Delta\delta = \delta_{н.н.} - \delta_{Казак.}$ |
|----------|---|------------------------|------------------------------|--------------------------------|---|--|
|          |   | Натурные<br>наблюдения | По выведенной<br>зависимости | По способу<br>Д.А.Казаковского |   |  |
| 1        | Донецкий бассейн                            | 85                     | 82                           | 80                             | 3   | 5  |
| 2        | Кузнецкий бассейн                           | 72                     | 75                           | 71                             | -3  | 1  |
| 3        | Карагандинский бассейн                      | 75                     | 74                           | 70                             | 1   | 5  |
| 4        | Челябинский бассейн                         | 70                     | 73                           | 69                             | -3  | 1  |
| 5        | Кизеловский бассейн                         | 85                     | 81                           | 78                             | 4   | 7  |
| 6        | Львовско-Волынский бассейн                  | 66                     | 71                           | 67                             | -5  | -1   |
| 7        | Воркутинское, Воргашорское месторождение    | 84                     | 80                           | 78                             | 4   | 7  |
| 8        | Интинское месторождение Печерского бассейна | 65                     | 70                           | 54                             | -5  | 12   |
| 9        | Артемовское, Тавричанское месторождения     | 65                     | 69                           | 51                             | -4  | 14   |
| 10       | Липовецкое месторождение                    | 70                     | 73                           | 69                             | -3  | 1  |
| 11       | Подмосковный бассейн                        | 55                     | 58                           | 44                             | -3  | 11   |
| 12       | Ахалцихское месторождение                   | 55                     | 58                           | 44                             | -3  | 11   |
| 13       | Ангренское месторождение                    | 60                     | 65                           | 48                             | -5  | 13   |
| 14       | Приморскуголь                               | 65                     | 69                           | 51                             | -4  | 14   |
| 15       | Ленгерское месторождение                    | 65                     | 69                           | 51                             | -4  | 14   |
| 16       | Сахалинуголь                                | 55                     | 58                           | 44                             | -3  | 11   |
|          |   |                        |                              | Средние                        | $\pm 2$                                       | $\pm 8$  |

Таким образом, с учетом установленных зависимостей углов сдвижения от основных влияющих факторов, была выведена эмпирическая формула для определения углов сдвижения:

$$\delta = 50^{\circ} + 1^{\circ} \left( \sqrt{f_{cp.}} + \sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{\gamma H}} + \sqrt{\frac{D}{H}} + \sqrt{\frac{H}{m}} \right) \quad (2.5)$$

Имея данные, по ряду месторождений определенные натурным путем (таблица 2.2) составим уравнения с четырьмя неизвестными, взяв за основу метод Гаусса.

$$\begin{cases} 2,4x_{11} + 3,7x_{12} + 0,9x_{13} + 16,9x_{14} = 30 \\ 1,8x_{21} + 3,5x_{22} + 1x_{23} + 6,7x_{24} = 20 \\ 1,7x_{31} + 4,2x_{32} + 1,8x_{33} + 6,8x_{34} = 22 \\ 2,3x_{41} + 7,6x_{42} + 1,1x_{43} + 7,5x_{44} = 32 \end{cases} \quad (2.6)$$

Произведем над полученной системой уравнений элементарные преобразования. Для этого выпишем матрицу из коэффициентов при неизвестных системы (20) с добавлением столбца свободных членов, другими словами расширенную матрицу  $\bar{A}$  для системы (20):

$$A = \begin{pmatrix} 2,4 & 3,7 & 0,9 & 16,9 & 30 \\ 1,8 & 3,5 & 1 & 6,7 & 20 \\ 1,7 & 4,2 & 1,8 & 6,8 & 22 \\ 2,3 & 7,6 & 1,1 & 7,5 & 32 \end{pmatrix} \quad (1). \quad A = \begin{pmatrix} 2,4 & 3,7 & 0,9 & 16,9 & 30 \\ 0 & 0,9 & 0,5 & 7,9 & -3,4 \\ 0 & -2,1 & -1,7 & 7,3 & -1 \\ 0 & -4,2 & -0,3 & 9,1 & -3,3 \end{pmatrix} \quad (2).$$

$$A = \begin{pmatrix} 2,4 & 3,7 & 0,9 & 16,9 & 30 \\ 0 & 0,9 & 0,5 & -7,9 & -3,4 \\ 0 & 0 & -0,3 & -4,8 & -3,8 \\ 0 & 0 & 0,4 & -6,0 & -4,1 \end{pmatrix} \quad (3). \quad A = \begin{pmatrix} 2,4 & 3,7 & 0,9 & 16,9 & 30 \\ 0 & 0,9 & 0,5 & -7,9 & -3,4 \\ 0 & 0 & -0,3 & -4,8 & -3,8 \\ 0 & 0 & 0 & -9 & -7 \end{pmatrix} \quad (4).$$

Матрице (5) соответствует система уравнений:

$$\begin{cases} 2,4x_1 + 3,7x_2 + 0,9x_3 + 16,9x_4 = 30 \\ 0,9x_2 + 0,5x_3 - 7,9x_4 = -3,4 \\ -0,3x_2 - 4,8x_4 = -3,8 \\ -9x_4 = -7 \end{cases} \quad (2.7)$$

которая получается из системы (20) с помощью некоторого числа элементарных преобразований и, следовательно, равносильна системе (20). Если в системе (4)  $r = n$ , то из последнего уравнения, находим единственное значение  $x_4$ , из предпоследнего уравнения – значение  $x_3$  и т.д., наконец, из первого уравнения – значение  $x_1$ .

Неизвестные  $x_1, \dots, x_n$  называются свободными. Из системы (21) определяем значения  $x_1 \dots x_4$ , где:

$$X_4 = 0,7 \text{ показатель перед } \sqrt{\frac{H}{m}}; \quad X_3 = 1,6 \text{ показатель перед } \sqrt{\frac{D}{H}};$$

$$X_2 = 3,2 \text{ показатель перед } \sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{\gamma H}}; \quad X_1 = 3,5 \text{ показатель перед } \sqrt{f}.$$

Подставив полученные значения  $X_1 \dots X_4$  в уравнение (2.5) получим:

$$\delta = 50^0 + 1^0 \left( 3,5 \sqrt{f_{ср.}} + 3 \sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{\gamma H}} + 2 \sqrt{\frac{D}{H}} + 0,7 \sqrt{\frac{H}{m}} \right) \quad (2.8)$$

Основываясь на обработке результатов инструментальных наблюдений с учетом установленных зависимостей углов сдвижения от основных влияющих факторов, была выведена формула для определения углов сдвижения (2.8)

где:  $f_{ср.}$  – средневзвешенное значение коэффициента крепости;

$m$  – мощность пласта, [м];

$\sigma_{сж}$  – предел прочности на одноосное сжатие, [т/м<sup>2</sup>];

$\gamma$  – объемный вес, [т/м<sup>3</sup>];

$H$  – глубина залегания горных пород, [м];

$D$  – размер выработки [м];

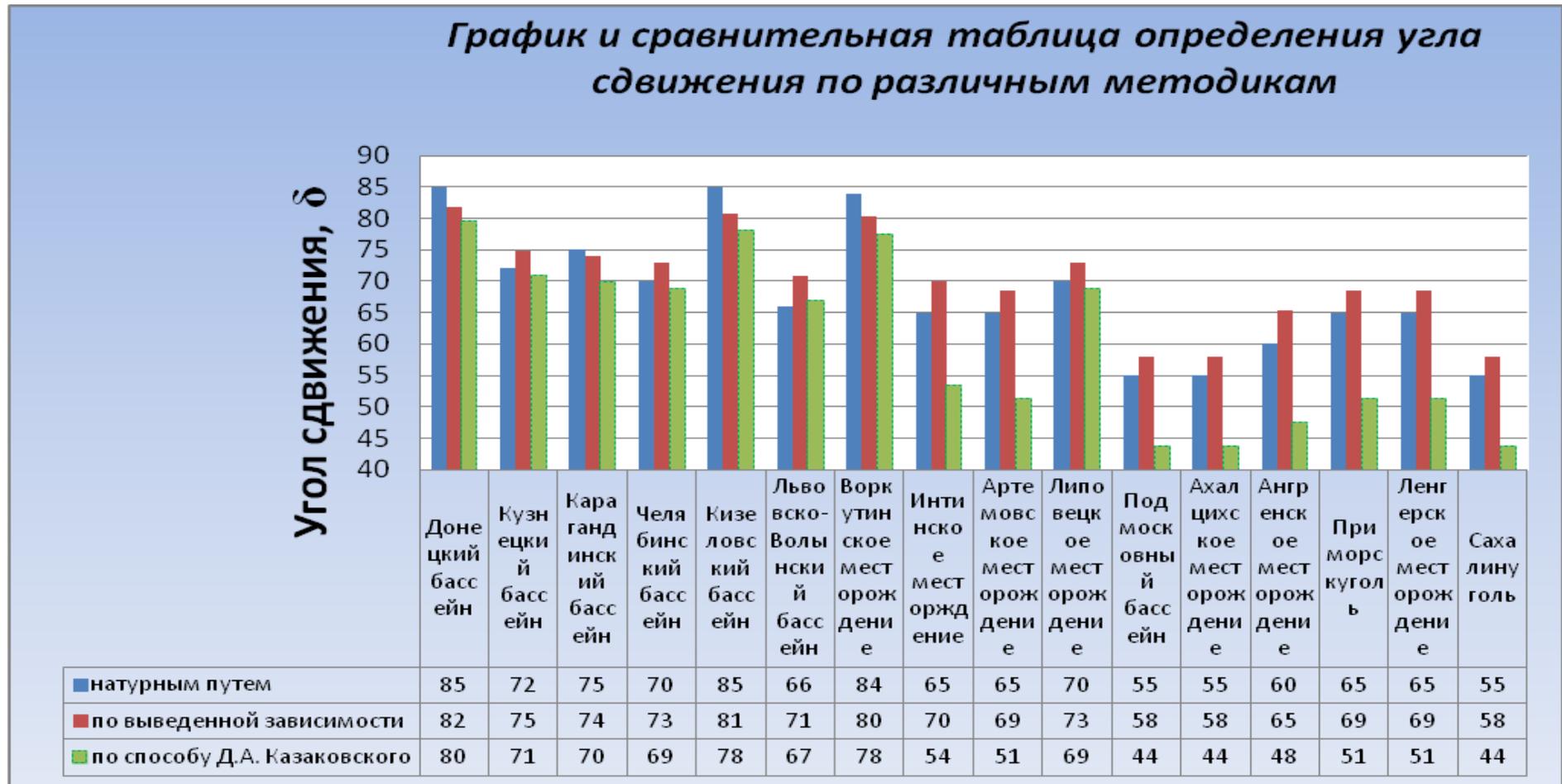
В качестве  $f_{cp}$  принимают средневзвешенное по мощности слоев значение коэффициента крепости пород над серединой выработанного пространства:

$$f_{cp} = \frac{f_1 m_1 + f_2 m_2 + \dots + f_n m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (2.9)$$

Где  $f_1 \dots f_n$  - коэффициенты крепости основных литологических разностей коренных пород;  $m_1 \dots m_n$  - мощности основных литологических разностей пород.

Используя выведенную зависимость (2.8) были вычислены углы сдвижения для Донецкого, Кизеловского, Львовско-Волынского бассейнов, Воркутинского, Воргашорского и еще ряда месторождений из таб. 2.1. По данным таблицы 2.1, была построена гистограмма значений углов сдвижения определенные натурным путем, по способу Д.А. Казаковского и по выведенной зависимости (рис 2.8).

Анализ приведенных данных показывает, что расхождение величин общих углов сдвижения, определенных по результатам инструментальных наблюдений (фактических) и рассчитанных углов составляют  $+4 \dots -5^\circ$  при среднем квадратическом отклонении  $\pm 2^\circ$ . Разность общих, вычисленных по методу Д.А. Казаковского, и фактических углов сдвижения достигает величин  $+14 \dots -1^\circ$ , а их средеквадратическое отклонение равно  $\pm 8^\circ$ . Таким образом, среднеквадратическое отклонение вычисленных углов от измеренных составляет  $\pm 2^\circ$ , тогда как отклонение углов сдвижения, определенных по составленной классификации Д.А. Казаковского [25] и Правилам [56] (которые не учитывали в совокупности влияние таких факторов, как глубина горных работ, мощность пласта, структуры, строение и состояние массива горных пород) от измеренных углов, составляет  $\pm 8^\circ$ .



**Рис.2.6** График определения угла сдвига по различным методикам

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

При современных глубинах разработки месторождений для определения угловых параметров необходимо и достаточно учитывать четыре основных фактора, характеризующие:

1. Свойства;
2. Состояние;
3. Строение;
4. горно-геологические условия разработки месторождения, к которым относят:
  - а) коэффициента крепости по М.М. Протоdjяконову
  - б) размера очистной выработки, который учитывается через соотношение  $D/H$ ;
  - в) отношения глубины горных работ к мощности пласта.

Которые описываются выражением:

$$\delta = 50^{\circ} + 1^{\circ} \left( 3,5\sqrt{f_{cp.}} + 3\sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{\gamma H}} + 2\sqrt{\frac{D}{H}} + 0,7\sqrt{\frac{H}{m}} \right)$$

Все вышперечисленные факторы использовались ранее для определения угла сдвигения отдельно друг от друга, хотя каждый из них оказывает определенное влияние на угол сдвигения и не может быть рассмотрен отдельно друг от друга. Использование полученной зависимости позволяет оперативно и более точно определить угловые параметры на любом этапе проектирования и эксплуатации месторождения, в том числе и для месторождений с неизученным характером процесса сдвигения и своевременно корректировать эти параметры в изменившихся условиях залегания и разработки запасов. Выведенная зависимость определения угла сдвигения, значительно повышает надежность нахождения границ зоны вредного влияния подземных разработок на земной поверхности и в массиве горных пород.

### **3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ СОСТОЯНИЕ И СТРОЕНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД**

#### **3.1 Анализ зависимости прочности горных пород на сжатие от глубины их залегания**

Важнейшей задачей проектирования разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом является обеспечение устойчивости горных выработок. Решению данной задачи посвящены многочисленные научные исследования, основные результаты которых нашли отражение в действующих Правилах охраны сооружений от вредного влияния горных разработок. Однако эти Правила неприемлемы на новых месторождениях (в период проектирования шахт) и на разрабатываемых месторождениях с неизученным характером сдвижения горных пород, что обусловлено большим многообразием как инженерно-геологических особенностей породных массивов, так и технологии строительства подземных выработок.

Критерии устойчивости горных пород основаны, как правило, на сопоставлении прочности породного массива и напряжений на контуре выработки. Для обоснованного использования результатов лабораторного изучения прочностных характеристик пород необходимо учитывать влияние влажности, горного давления, масштабного эффекта, коэффициента структурного ослабления и трещиноватости породного массива на его прочность. В основном, все классификации, разработанные ранее, базируются на одном показателе – прочности пород, в то время как геомеханическое состояние массива определяется, прежде всего, отношением нагрузки на горную породу к ее прочности. При одной и той же прочности пород это отношение, в зависимости от глубины, может меняться в несколько раз, что необходимо учитывать, особенно при современных глубинах разработки месторождений полезных ископаемых. С увеличением глубины залегания физико-механические свойства пород могут изменяться. Это объясняется тем, что породы, залегающие на большой глубине, подвергаются значительному всестороннему сжатию, вызванному геостатическим давлением [24].

Под влиянием всестороннего сжатия происходит уплотнение пород. Наибольшее уплотнение пористых пород происходит до глубины залегания -1500 м. Сжимающие напряжения, обусловленные горным давлением на большой глубине разработки, приводят к смыканию трещин и пор, увеличивая сплошность породы.

Так, для разработки месторождений с неизученным характером процесса сдвижения проектирование необходимо вести постадийно, в зависимости от полноты исходных данных, в том числе от:

1. прочности  $\delta_{сж}$
2. отношения веса налегающих пород к их прочности

$$\frac{\gamma H}{\delta_{сж}} \quad (3.1)$$

3. отношения веса налегающих пород к их прочности, с учетом коэффициента структурного ослабления

$$\frac{\gamma H}{\delta_{сж} K_c} \quad (3.2)$$

где:  $\delta_{сж}$  – прочность горных пород, [т/м<sup>2</sup>];

$\gamma$  – Объемный вес, [т/м<sup>3</sup>];

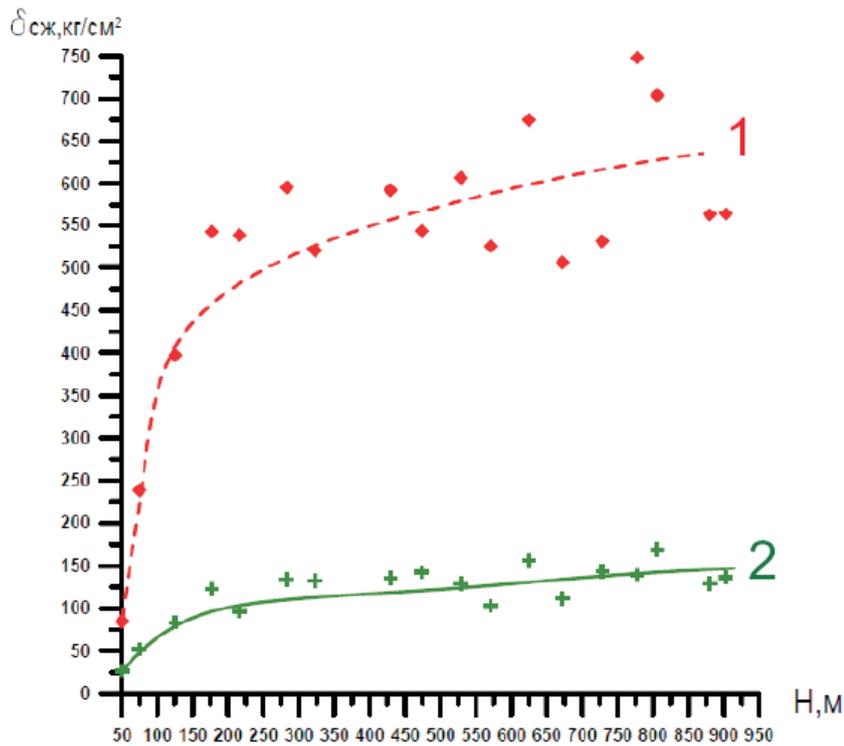
$H$  – глубина залегания горных пород, [м];

$K_c$  – коэффициент структурного ослабления.

Для подтверждения вышесказанного были взяты данные о физико-механических свойствах горных пород Карагандинского угольного бассейна. Вопросами наиболее подробного исследования физико-механических свойств горных пород Карагандинского бассейна занималась Ж.М. Канлыбаева [27].

Путем обработки материалов многолетних натуральных наблюдений физико-механических свойств горных пород и анализа их влияния на процессы сдвижения массива, была получена достаточно определенная закономерность прочности горных пород от глубины их залегания, а также влияние коэффициента

структурного ослабления на прочность  $\delta_{сж}$  горных пород. На основе полученных данных была построена зависимость изменения предела прочности горных пород на сжатие с глубиной их залегания, в том числе и с учетом коэффициента структурного ослабления Рис.3.1.



**Рис. 3.1** Изменение предела прочности на сжатие образцов песчаника с глубиной их залегания:

- 1 – Без учета коэффициента структурного ослабления;
- 2 – С учетом коэффициента структурного ослабления.

Из анализа полученной зависимости (рис. 3.1) вытекает, что существует определенная тенденция увеличения прочности пород с глубиной, при этом до глубины 450 м., временное сопротивление пород сжатию быстро возрастает, далее рост  $\delta_{сж}$  замедляется. В свою очередь, при использовании отношения веса налегающих пород к их прочности, с учетом коэффициента структурного ослабления, четко прослеживается, что прочность горных пород с увеличением глубины, постепенно возрастает до глубины 100 м., а далее рост  $\delta_{сж}$  практически

прекращается. Учитывая указанную тенденцию, мы попытались найти зависимость изменения  $\delta_{сж}$  с увеличением глубины залегания.

Эта зависимость имеет вид, приведенный на рисунке 3.1., и описывается эмпирическим выражением

$$\delta_{сж} \approx 126,6 \times H^{0,25} \text{ при } (100 < H < 1000) \quad (3.3)$$

где:  $\delta_{сж}$  – прочность горных пород, [т/м<sup>2</sup>];

H – глубина залегания горных пород, [м];

Таким образом, полученные результаты указывают на тенденцию увеличения пределов прочностей пород с глубинной их залегания. Коэффициент структурного ослабления оказывает существенное влияние на прочность горных пород в массиве, т.е. прочность горных пород в массиве значительно снижается с учетом коэффициента структурного ослабления.

### **3.2 Анализ влияния влажности на прочностные свойства горных пород**

На соотношение прочности горных пород в массиве к прочности горных пород в образце влияют, как структурные неоднородности (частота трещин, включений и т.п.), так и влажность массива.

Физико-механические свойства слагающих горный массив пород весьма разнообразны и нестабильны. Особенно это относится к прочностным и деформационным характеристикам, которые оказывают существенное влияние на сдвиг горного массива и земной поверхности [6]. Прочностные характеристики сухих пород довольно детально изучены при одноосном и при трехосном напряженном состоянии [30, 50]. Известно, что в процессе водонасыщения горных пород происходит снижение упругих и прочностных показателей, увеличивается трещинообразование [6]. В сухом состоянии слагающие массив осадочные горные породы представляют собой двухфазные системы, состоящие из спрессованных различного рода и размеров твердых частиц. По характеру отношения к воде твердые частицы можно разделить на

водоотталкивающие (гидрофобные) и смачиваемые (гидрофильные). Пустоты разделяют на разного размера и формы поры между частицами, а также на трещины. Поступающая в горный массив вода выступает как третья фаза, которая содержится в пустотах в виде паров, пленок, капель, свободной воды и т.п. Различают также физически связанную и кристаллизационную воду [62]. В связи с этим особое значение приобретают данные о естественной влажности, т. е. влажности пород в условиях естественного залегания. Величина естественной влажности пород зависит от многих факторов: климатических и гидрогеологических условий района распространения пород, их генезиса, состава и состояния.

Скальные породы, обладающие незначительной пористостью, имеют соответственно и малую влажность. Поскольку она не превышает долей процента или нескольких процентов, для практических расчетов ею можно пренебречь. Полускальные породы могут иметь уже большую влажность - до 15-20%, а иногда и выше. Для них влияние влажности на прочностные свойства уже существенно, и поэтому ее необходимо учитывать. Наиболее широкий диапазон колебания влажности характерен для рыхлых дисперсных пород. Следует заметить, что влажность песчаных пород зависит от их крупности, содержания глинистых и органических частиц, а влажность глинистых пород - от минералогического состава глинистой фракции, состава обменных катионов и других факторов. Влажность горных пород оказывает большое влияние на их физико-механические свойства. Влажность сказывается на прочности, морозостойкости, теплоемкости и других свойствах скальных и полускальных пород [68].

В связи с этим особое значение приобретают данные о естественной влажности, т. е. влажности пород в условиях естественного залегания. Количество воды, содержащейся в породе в естественных условиях, называют естественной влажностью. Транспортировка, длительное хранение и другие факторы вызывают изменение естественной влажности, что отражается на соотношении прочности горных пород в массиве к прочности горных пород в образце.

Вопросами изучения влияния влажности на прочностные свойства горных пород занимались К.Б. Бакитов, К.Ш. Джанбуршина, Ж.М. Канлыбаева, А.А. Коззев, В.Ю. Изаксон, Н.К. Звонорев [27; 32]. На основе данных, используемых в [27], и собственных исследований, была составлена таблица 3.1 со следующими характеристиками:

1. прочности горных пород при естественной влажности;
2. коэффициент естественной влажности  $W_{\text{ест.}}$  непосредственно в массиве
3. коэффициент влажности при лабораторных испытаниях  $W_{\text{лаб.}}$ .

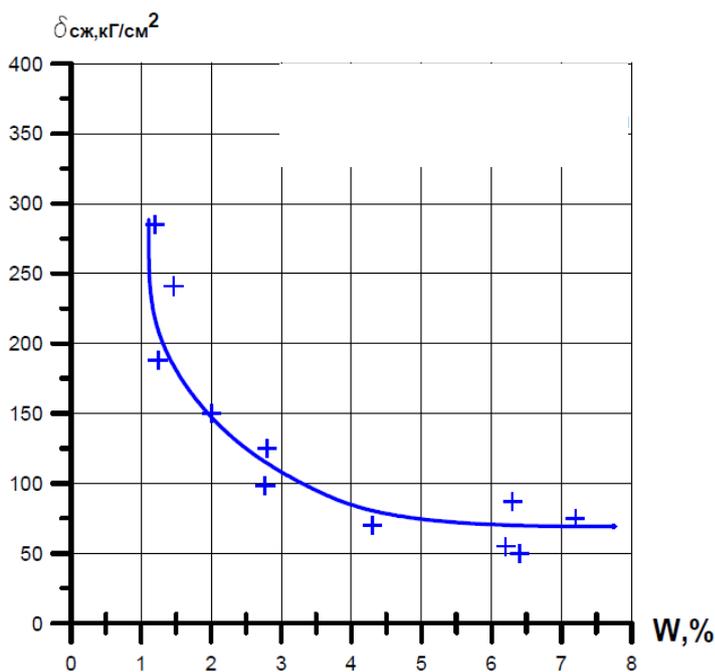
По данным таблицы 3.1 между параметрами  $\sigma_{\text{сж.}}$  и влажности пород  $W_{\text{ест.}}$ ,  $W_{\text{лаб.}}$  можно проследить зависимость.

Эта зависимость наглядно выражена на рис.3.2, из которой видно, что временное сопротивление пород на сжатие зависит от их влажности и эмпирически может быть описана гиперболической зависимостью вида:

$$\delta_{\text{сж}} = \frac{a}{W} \quad (3.4)$$

где:  $\delta_{\text{сж}}$  - предел прочности при одноосном сжатии [МПа];

$W$  - влажность [%].



**Рис.3.2** График зависимости временного сопротивления сжатию образца от влажности в естественных условиях.

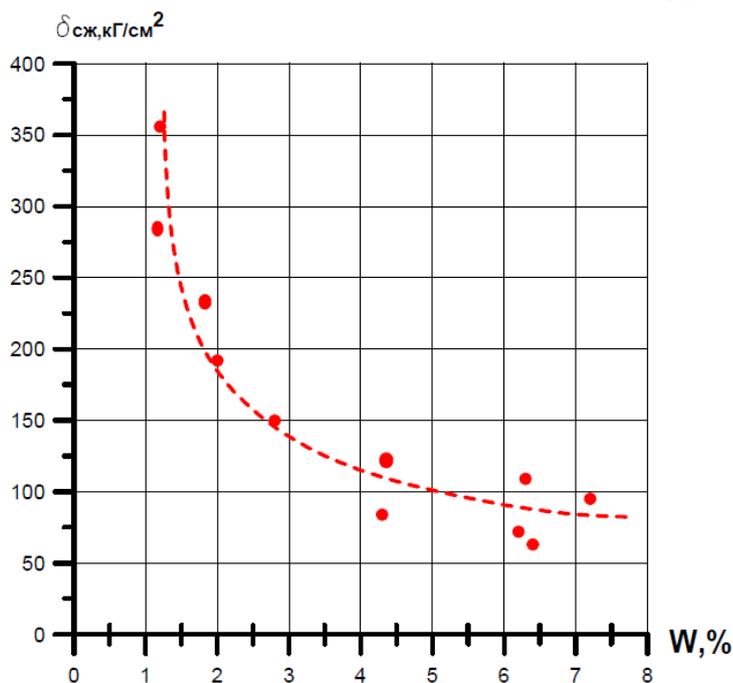
Временное сопротивление пород на сжатие обратно пропорционально их влажности в лабораторных условиях, т.е. независимо от качества упаковки проб образцов происходит значительная потеря естественной влажности данных образцов.

Таблица 3.1.

| ПОРОДА                                    | Предел прочности при естественной влажности, $\sigma_{сж}$ , кг/см <sup>2</sup> | Естественная влажность, $W_{ест.}$ % | Предел прочности при лабораторной влажности, $\sigma_{сж}$ , кг/см <sup>2</sup> | Лабораторная влажность, $W_{лаб.}$ % |
|---|---|--------------------------------------|---|--------------------------------------|
| Красно-желтый песчаник                    | 50  | 8,3                                  | 63  | 6,4                                  |
| Темно-серый аргиллит                      | 55  | 8,5                                  | 72  | 6,2                                  |
| Темно –серый однородный алевролит         | 70  | 4,8                                  | 84  | 4,3                                  |
| Темно –серый алевролит                    | 75  | 7,7                                  | 95  | 7,2                                  |
| Темно –серый слоистый алевролит           | 87  | 6,8                                  | 109   | 6,3                                  |
| Серый алевролитовый песчаник              | 125   | 4,7                                  | 150   | 2,8                                  |
| Серый однородный песчаник                 | 150   | 4,7                                  | 192   | 2                                    |
| Серый среднезернистый однородный песчаник | 285   | 2,7                                  | 356   | 1,2                                  |

Соотношение временного сопротивления пород на сжатие от естественной влажности, т. е. влажности пород в условиях естественного залегания выражение (3.4) примет вид

$$\delta_{сж} = \frac{400}{W_{ест.}} \quad (3.5)$$



**Рис.3.3** График зависимости временного сопротивления сжатию образца от влажности в лабораторных условиях.

Таким образом, зависимость временного сопротивления пород на сжатие от влажности непосредственно в лабораторных условиях примет вид:

$$\delta_{сж} = \frac{750}{W_{\text{лаб.}}} \quad (3.6)$$

Общий анализ данных, приведенных в таблице 3.1. и отображенных на рис.3.2 и рис.3.3, показывает, что минимальная влажность, которая может сохраняться в массиве 1,5 %, т.е. в естественных условия породы нельзя осушить меньше чем на 1,5 %. В то время, как минимальная влажность образцов горных пород в лабораторных условиях падает на 0,5 % и составляет 1,0 %. Таким образом, снижение влажности ведет к увеличению прочности пород. Учитывая все выше перечисленные особенности при определении геомеханического состояния необходимо принимать во внимание то, что естественная влажность горных пород меняется в пределах от 1,5% до 8,5%. Вообще влажность с глубинной уменьшается. Такой характер изменения влажности горных пород необходимо учитывать при прогнозировании процессов сдвижения горных пород и определении параметров систем разработки.

### **3.3 Аналитический метод определения параметрического значения показателя (коэффициента) структурного ослабления**

Ученых всего мира все чаще стала привлекать фундаментальная проблема описания протекания различных физических процессов в средах сложного структурного строения. К таким средам в первую очередь следует отнести массив горных пород. Многочисленными опытами было обнаружено, что при изменении размеров образцов из различных материалов их свойства (в том числе и прочность) меняются. Важность этой проблемы для горной промышленности состоит в том, что все горно-инженерные воздействия на массив должны выполняться на основе достоверных знаний о свойствах и состоянии горных пород, слагающих этот массив. При этом главная сложность состоит в том, чтобы перенести результаты лабораторных испытаний породных образцов малых размеров на достаточно большие участки массива сложного структурного строения.

Прочностные и деформационные свойства образца существенно отличаются от тех же свойств массива, т.к. в реальном структурно неоднородном теле, вероятность встречи дефектов (трещин, включений и т.п.) у крупных тел выше и поэтому с увеличением объема прочность неизбежно должна уменьшаться. Существуют понятия «свойства горных пород в массиве» и «свойства массива горных пород». Под свойствами пород в массиве понимаются свойства горных пород в объемах элементарного блока, соизмеримых с размерами лабораторных образцов. Показатели свойств пород в элементарных блоках зависят от объема породы и изменяются от показателей свойств элементарного блока в целом до показателей свойств отдельных породообразующих минералов. Под свойствами массива горных пород понимают их свойства в объемах, превосходящих размеры элементарного блока; массив при этом рассматривается как состоящая из элементарных блоков конструкция. Показатели свойств массива горных пород, так же как и показатели свойств пород в массиве, широко варьируют с изменением размеров массива и его состояния [38].

Свойства большинства горных пород неодинаковы по различным направлениям. Эта особенность, называемая анизотропией, на практике проявляется в том, что горная порода отделяется от массива по одним направлениям с меньшими затратами энергии, чем по другим. На анизотропию механических свойств массивов существенное влияние оказывает трещиноватость горных пород. Под анизотропией механических свойств (в макрообразце) понимают различие в численных значениях конкретных показателей, определенных по трем ортогональным направлениям; при этом основным является направление напластования или (при наличии) слоистости, два других взаимно перпендикулярны к основному. Ряд свойств горных пород (таких, как прочность, устойчивость, деформируемость и др.) важно характеризовать не только средними показателями, но и показателями, учитывающими неоднородность массива горных пород. Остановимся подробнее на прочности горных пород с учетом показателя неоднородности массива горных пород. Для этого рассмотрим эмпирический критерий прочности, широко применяемый в

зарубежной расчетной практике, критерий Хоека-Брауна [88], предложенный в виде:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{сж.Л} \left( m \frac{\sigma_3}{\sigma_{сж.Л}} + S \right)^a \quad (3.7)$$

где:  $\sigma_{сж.Л}$  - прочность на одноосное сжатие ненарушенных горных пород (в образце);

$\sigma_3$  – главное напряжение;

$m$  и  $S$  - безразмерные константы материала

$a$  - показатель степени, ранее принимаемый равным 0,5.

Чтобы получить прочность породы в массиве на одноосное сжатие, надо задать в уравнении (3.7) минимальное главное напряжение равным нулю  $\sigma_3 = 0$ ;

$$\sigma_{сж.М} = \sigma_{сж.Л} S^a \quad (3.8)$$

Таким образом, параметр  $S$  в критерии Хоека-Брауна выполняет роль учета степени нарушенности массива и снижения его прочности на сжатие по сравнению с образцом.

$$S^a = \frac{\sigma_{сж.М}}{\sigma_{сж.Л}} \quad (3.9)$$

Если в уравнении (3.7) создать двухосное равномерное растяжение  $\sigma_1 = \sigma_3 < 0$ ; то массив разрушится, когда они достигнут уровня прочности на растяжение, что получаем, приравнявая в (3.7) выражение в скобках нулю:

$$\sigma_{рас.М} = \frac{\sigma_{рас.Л} \times S}{m} \quad (3.10)$$

По аналогии с выражением (3.9), где постоянная  $S$  выполняет роль показателя нарушенности массива, можем определить прочность на одноосное растяжение ненарушенного образца породы как

$$\sigma_{рас.Л} = \frac{\sigma_{сж.Л}}{m} \quad (3.11)$$

Таким образом, физический смысл постоянной  $m$  это соотношение предела прочности на одноосное сжатие к пределу прочности на растяжение ненарушенной породы (в образце).

$$m = \frac{\sigma_{сж.Л}}{\sigma_{рас.Л}} \quad (3.12)$$

Подставив в выражение (3.10) выражения (3.9) и (3.12) получим

$$\sigma_{рас.М} = \frac{\sigma_{рас.Л}}{\sigma_{сж.Л}} \sigma_{рас.Л} \left( \frac{\sigma_{сж.М}}{\sigma_{сж.Л}} \right)^{\frac{1}{a}} \quad (3.13)$$

Разделим каждый из членов выражения (3.13) на  $\sigma_{рас.Л}$ .

$$\frac{\sigma_{рас.М}}{\sigma_{рас.Л}} = \frac{\sigma_{рас.Л}}{\sigma_{сж.Л}} \left( \frac{\sigma_{сж.М}}{\sigma_{сж.Л}} \right)^{\frac{1}{a}} \quad (3.14)$$

В левой части выражении (3.14) отношение прочности пород на растяжение в массиве к прочности пород на растяжение в лабораторных условиях является коэффициент структурного ослабления. В правой части выражения (3.14) отношение прочности пород на сжатие в массиве к прочности пород на сжатие в образце, также есть коэффициент структурного ослабления. Из этого следует, что возможно сделать переход от показателя неоднородности массива горных пород к коэффициенту структурного ослабления.

В механике горных пород, Г.Л. Фисенко [75] впервые ввел понятие коэффициента структурного ослабления, численно равного отношению пределов прочности на одноосное сжатие массива и его стандартного образца.

$$K_c = \frac{\sigma_{сж.М}}{\sigma_{сж.Л}} \quad (3.15)$$

где:  $\sigma_{сж.Л}$  – прочность горных пород в образце [кГ/см<sup>2</sup>];

$\sigma_{сж.М}$  – прочность горных пород в массиве [кГ/см<sup>2</sup>].

Вопросами изучения коэффициента структурного ослабления занималось большое количество ученых. Одновременно с Г.Л. Фисенко вопросами изучения коэффициента структурного ослабления занимались С.Е.

Чирков, Б.З. Амусин, В.В. Райский. Влияние трещиноватости на упругие характеристики массива детально было изучено К.В. Руппением [68]. В частности, им была выведена формула определения модуля упругости массива, разбитого зияющими и заполненными трещинами. Принципиально иной путь различия прочности образца и массива базируется на существовании общих закономерностей в поведении породного массива и деформирования образца за пределом прочности. В 1985 г. Н.К. Звонаревым [20] был предложен метод построения реологических зависимостей для массива горных пород по результатам испытания образцов.

Для определения коэффициента структурного ослабления справедливо равенство:

$$K_c = \frac{\sigma_{сжМ.}}{\sigma_{сжЛ.}} = \frac{\sigma_{рас.М}}{\sigma_{рас.Л.}} \quad (3.16)$$

Таким образом, возможно, сделать переход от показателя неоднородности массива горных пород к коэффициенту структурного ослабления, для этого в выражение (3.14) произведем замену выражением (3.16):

$$K_c = \frac{\sigma_{рас.Л.}}{\sigma_{сж.Л.}} (K_c)^{\frac{1}{a}} \quad (3.17)$$

$$П_n^{\frac{a-1}{a}} = \frac{\sigma_{рас.Л.}}{\sigma_{сж.Л.}} \quad (3.18)$$

В результате преобразований эмпирического критерия Хоека-Брауна было установлено, что этот критерий, характеризующий неоднородность массива горных пород  $П_n$  описывается выражением вида (3.19):

$$П_n = \sqrt[a]{\left(\frac{\sigma_{рас.Л.}}{\sigma_{сж.Л.}}\right)^{a-1}} \quad (3.19)$$

где:  $П_n$  - показатель неоднородности массива горных пород;

$\sigma_{рас.л.}$  и  $\sigma_{сж.л.}$  – пределы прочности пород на растяжение и на сжатие соответственно, определённые в лабораторных условиях.

Используя указанный критерий и базирясь на теории подобия процессов на микро- и макроуровнях, нами выполнен анализ лабораторных и натуральных испытаний на месторождении «Черниговец».

Для проверки этой гипотезы был выполнен анализ лабораторных и натуральных испытаний на месторождении «Черниговец»[57].

На данном месторождении по всем профилям на участках формирования временно нерабочих бортов были отобраны образцы пород и испытаны в соответствии с ГОСТом 21153.4-75.

Результаты определения физико-механических свойств 1180 образцов пород были систематизированы и часть из них приведены в табл. 3.2.

**Таблица 3.2**

| Номер горизонта и мешка | $\sigma_{раст.}$<br>МПа | $\sigma_{сж.}$<br>МПа | $\frac{\sigma_{раст}}{\sigma_{сж}}$ | $P_n$ | Коэффициент структурного ослабления,<br>$K_c$ | $K_c - P_n$ |
|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------|---|-------------|
| Гор. 640 Меш. 1         | 11,5                    | 97                    | 0,119                               | 0,041 | 0,039   | -0,002      |
| Гор. 690 Меш. 62        | 14                      | 132                   | 0,106                               | 0,035 | 0,038   | 0,003       |
| Гор. 710 Меш. 63        | 11,6                    | 111                   | 0,105                               | 0,034 | 0,037   | 0,003       |
| Гор. 720 Меш. 56        | 14,4                    | 109                   | 0,132                               | 0,048 | 0,039   | -0,009      |
| Гор. 770 Меш. 31        | 1,46                    | 17,7                  | 0,082                               | 0,024 | 0,020   | -0,004      |
| Гор. 770 Меш. 41        | 17,7                    | 181                   | 0,098                               | 0,031 | 0,029   | -0,002      |
| Гор. 690 Меш. 53        | 21,9                    | 197                   | 0,111                               | 0,037 | 0,040   | 0,003       |
| Гор. 690 Меш. 60        | 16,7                    | 168                   | 0,099                               | 0,031 | 0,030   | -0,001      |
| Гор. 710 Меш. 54        | 13,9                    | 142                   | 0,098                               | 0,031 | 0,030   | -0,001      |
| Гор. 750 Меш. 64        | 11                      | 131                   | 0,084                               | 0,024 | 0,030   | 0,006       |
| Гор. 550 Меш. 15        | 18,1                    | 171                   | 0,106                               | 0,034 | 0,039   | 0,005       |
| Гор. 580 Меш. 25        | 20                      | 190                   | 0,105                               | 0,034 | 0,037   | 0,003       |
| Гор. 640 Меш. 3         | 12,3                    | 131                   | 0,094                               | 0,029 | 0,010   | -0,019      |
| Гор. 640 Меш. 30        | 12,5                    | 113                   | 0,111                               | 0,037 | 0,039   | 0,002       |
| Гор. 670 Меш. 40        | 11,6                    | 131                   | 0,089                               | 0,026 | 0,025   | -0,001      |
| Гор. 670 Меш. 50        | 7,14                    | 73,3                  | 0,097                               | 0,030 | 0,030   | 0,000       |
| Гор. 690 Меш. 55        | 11,8                    | 139                   | 0,085                               | 0,025 | 0,022   | -0,003      |
| Гор. 690 Меш. 57        | 11,5                    | 111                   | 0,104                               | 0,033 | 0,038   | 0,005       |
| Гор.590-1 Меш. 14       | 14,7                    | 140                   | 0,105                               | 0,034 | 0,039   | 0,005       |
| Гор.590-2 Меш. 22       | 13                      | 128                   | 0,102                               | 0,032 | 0,037   | 0,005       |
| Гор. 600-1 Меш. 9       | 15,7                    | 160                   | 0,098                               | 0,031 | 0,030   | -0,001      |
| Гор. 600 Меш. 10        | 11,5                    | 115                   | 0,100                               | 0,032 | 0,027   | -0,005      |
| Гор. 620-1 Меш. 29      | 14,2                    | 141                   | 0,101                               | 0,032 | 0,039   | 0,007       |
| Гор. 620-2 Меш. 42      | 14,2                    | 139                   | 0,102                               | 0,033 | 0,036   | 0,003       |
| Гор. 640-1 Меш. 32      | 14,3                    | 130                   | 0,110                               | 0,036 | 0,037   | 0,001       |

|                  |       |        |       |       |       |        |
|------------------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
| Гор. 550 Меш. 65 | 12,86 | 117,77 | 0,109 | 0,036 | 0,039 | 0,003  |
| Гор. 580 Меш. 2  | 14,88 | 121,59 | 0,122 | 0,043 | 0,038 | -0,005 |
| Гор. 590 Меш. 21 | 12,1  | 102,88 | 0,118 | 0,040 | 0,039 | -0,001 |
| Гор. 590 Меш. 39 | 16,26 | 151,98 | 0,107 | 0,035 | 0,037 | 0,002  |
| Гор. 610 Меш. 51 | 13,9  | 123,5  | 0,113 | 0,038 | 0,039 | 0,001  |
| Гор. 970 Меш. 44 | 12,93 | 117,92 | 0,110 | 0,036 | 0,040 | 0,004  |
| Гор. 670 Меш. 49 | 11,34 | 106,49 | 0,106 | 0,035 | 0,039 | 0,004  |
| Гор. 550 Меш. 49 | 9,3   | 93,41  | 0,100 | 0,031 | 0,035 | 0,004  |
| Гор. 570 Меш. 34 | 12,55 | 112,84 | 0,111 | 0,037 | 0,032 | -0,005 |
| Гор. 570 Меш. 48 | 8,68  | 145,39 | 0,060 | 0,015 | 0,010 | -0,005 |
| Гор. 590 Меш. 16 | 10,57 | 163,66 | 0,065 | 0,016 | 0,009 | -0,007 |
| Гор. 590 Меш. 26 | 10,68 | 152,92 | 0,070 | 0,018 | 0,015 | -0,003 |
| Гор. 620 Меш. 68 | 15,53 | 146,7  | 0,106 | 0,034 | 0,035 | 0,001  |
| Гор. 650 Меш. 33 | 9,38  | 207,85 | 0,045 | 0,010 | 0,010 | 0,000  |

В таблице 3.2 отражены, определенные лабораторным путем, показатели прочности пород на сжатие  $B_{сж}$  и прочности пород на растяжение  $B_{рас.}$ , значения показателя неоднородности массива горных пород.

Так же были обработаны результаты натуральных испытаний по определению показателя неоднородности массива горных пород на алмазных месторождениях, в частности на месторождении тр. Мир. Испытания проводились как при разведке месторождений в подземных разведочных выработках, так и в бортах эксплуатируемых карьеров [20].

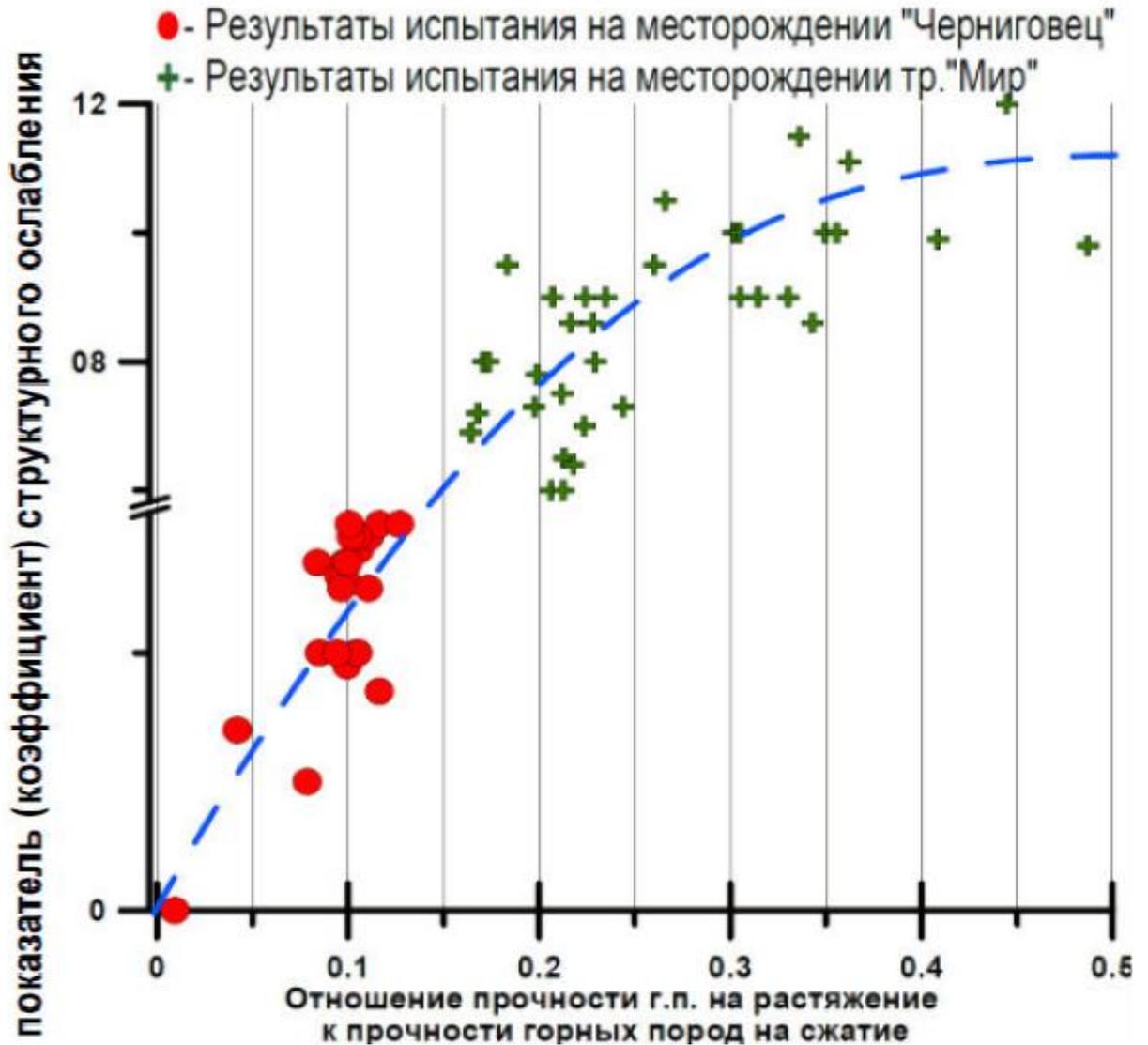
**Таблица 3.3**

| испытания      | сжатие, $\delta_{сж}$ | растяжение, $\delta_r$ | $\delta_r/\delta_{сж}$ | $K_c$ | $P_n$ | $K_c - P_n$ |
|----------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-------|-------|-------------|
| Карьер тр. Мир |                       |                        |                        |       |       |             |
| 1              | 67,5                  | 9,3                    | 0,138                  | 0,061 | 0,051 | 0,01        |
| 2              | 27,8                  | 4,5                    | 0,162                  | 0,07  | 0,066 | 0,004       |
| 3              | 16,9                  | 8,2                    | 0,485                  | 0,09  | 0,083 | 0,001       |
| 4              | 21,5                  | 10,8                   | 0,502                  | 0,085 | 0,074 | 0,011       |
| 5              | 78,6                  | 10,6                   | 0,135                  | 0,064 | 0,05  | 0,014       |
| 6              | 42,5                  | 6,3                    | 0,148                  | 0,06  | 0,057 | 0,003       |
| 7              | 25,6                  | 12,3                   | 0,480                  | 0,097 | 0,068 | 0,029       |
| 8              | 122                   | 15,8                   | 0,130                  | 0,066 | 0,047 | 0,019       |
| 9              | 81,1                  | 10,9                   | 0,134                  | 0,031 | 0,049 | -0,018      |
| 10             | 59,7                  | 8,4                    | 0,141                  | 0,076 | 0,052 | 0,024       |
| 11             | 66,6                  | 9,2                    | 0,138                  | 0,051 | 0,051 | 0           |

|    |       |      |       |       |       |        |
|----|-------|------|-------|-------|-------|--------|
| 12 | 116,2 | 15,1 | 0,130 | 0,066 | 0,047 | 0,019  |
| 13 | 71,3  | 9,8  | 0,137 | 0,076 | 0,051 | 0,025  |
| 14 | 79,9  | 10,8 | 0,135 | 0,059 | 0,05  | 0,009  |
| 15 | 64,4  | 25   | 0,388 | 0,072 | 0,052 | 0,02   |
| 16 | 59,8  | 8,4  | 0,140 | 0,056 | 0,052 | 0,004  |
| 17 | 71,8  | 9,8  | 0,136 | 0,046 | 0,051 | -0,005 |
| 18 | 28,7  | 14   | 0,488 | 0,101 | 0,065 | 0,036  |
| 19 | 33,5  | 5,2  | 0,155 | 0,076 | 0,062 | 0,014  |
| 20 | 34,1  | 5,3  | 0,155 | 0,086 | 0,061 | 0,025  |
| 21 | 56,8  | 8    | 0,141 | 0,066 | 0,053 | 0,013  |
| 22 | 63,4  | 8,8  | 0,139 | 0,05  | 0,052 | -0,002 |
| 23 | 17,2  | 3,3  | 0,192 | 0,086 | 0,083 | 0,003  |
| 24 | 31,9  | 5    | 0,157 | 0,076 | 0,063 | 0,013  |
| 25 | 35,4  | 5,4  | 0,153 | 0,07  | 0,06  | 0,01   |
| 27 | 67    | 9,2  | 0,137 | 0,046 | 0,051 | -0,005 |
| 28 | 52,6  | 7,5  | 0,143 | 0,044 | 0,054 | -0,01  |
| 29 | 27    | 4,4  | 0,163 | 0,086 | 0,067 | 0,019  |
| 30 | 54    | 7,7  | 0,143 | 0,076 | 0,054 | 0,022  |
| 31 | 31,9  | 5    | 0,157 | 0,08  | 0,063 | 0,017  |
| 32 | 44,2  | 16,5 | 0,373 | 0,081 | 0,056 | 0,025  |
| 33 | 29,5  | 4,7  | 0,159 | 0,076 | 0,064 | 0,012  |
| 34 | 129,9 | 16,8 | 0,129 | 0,058 | 0,046 | 0,012  |
| 35 | 140,3 | 18   | 0,128 | 0,055 | 0,046 | 0,009  |
| 36 | 14,3  | 6,9  | 0,483 | 0,096 | 0,092 | 0,004  |
| 37 | 50    | 7,2  | 0,144 | 0,059 | 0,055 | 0,004  |
| 38 | 16,7  | 3,2  | 0,192 | 0,096 | 0,084 | 0,012  |
| 39 | 33,5  | 5,2  | 0,155 | 0,086 | 0,062 | 0,024  |
| 40 | 26,3  | 4,4  | 0,167 | 0,086 | 0,067 | 0,019  |
| 41 | 19,1  | 3,5  | 0,183 | 0,106 | 0,078 | 0,028  |
| 42 | 98    | 13   | 0,133 | 0,081 | 0,048 | 0,033  |
| 43 | 57,4  | 18,1 | 0,315 | 0,072 | 0,103 | 0,019  |

В таблице 3.3 приведены значения прочности пород на сжатие и растяжение, вычисленное отношение выше перечисленных показателей, а также приведены данные результатов испытания по определению коэффициента структурного ослабления в массиве (на карьере тр. «Мир»).

Используя данные таблиц 3.2 и 3.3 построим график зависимости показателя неоднородности массива горных пород от отношения прочности пород на растяжение к прочности пород на сжатие, для этого по оси Y отложим значения показателя неоднородности массива горных пород, а по оси X значения отношения прочности пород на растяжение к прочности пород на сжатие рис.3.4.



**Рис. 3.4** График зависимости коэффициента структурного ослабления от отношения прочности пород на растяжение к прочности пород на сжатие.

Учитывая указанную тенденцию, полученную на Рис 3.4, была получена кривая, которую можно аппроксимировать выражением вида:

$$I_n = \lambda \times a \sqrt{\left(\frac{\sigma_{рас}}{\sigma_{сж}}\right)^{a-1}} \quad (3.20)$$

где:  $a = 2$

$$\lambda = \sigma_{рас}/\sigma_{сж}$$

$P_n$  – показатель неоднородности массива горных пород;

$\delta_{\text{рас.}}$  - предел прочности на растяжение [МПа];

$\delta_{\text{сж.}}$  - предел прочности на сжатие [МПа].

Анализ приведенных данных показал, что расхождение показателей неоднородности массива горных пород, определенных по результатам инструментальных наблюдений и рассчитанных по выведенной зависимости составляют 0,0...-0,02 при среднем квадратическом отклонении  $\pm 0,01$  на месторождении Черниговец и -0,01...-0,09 при среднем квадратическом отклонении  $\pm 0,05$  на месторождении тр. Мир.

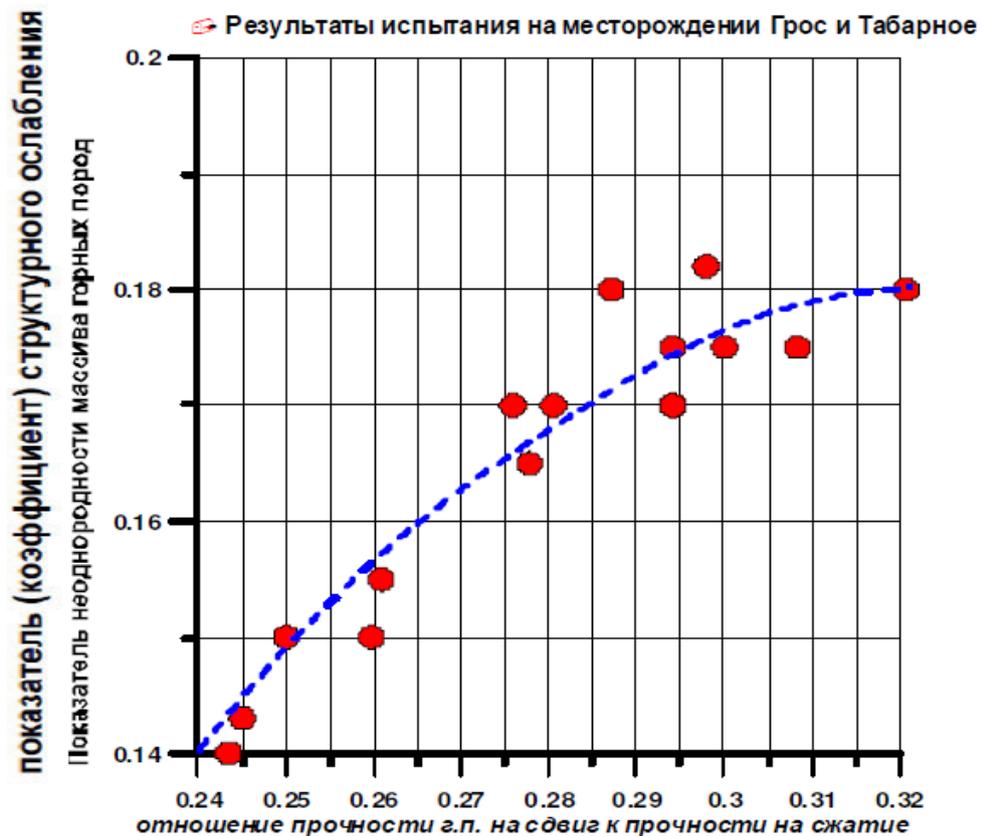
Поскольку определение прочности горных пород на растяжение является более трудоемкой и сложной задачей, нежели определение прочности горных пород на сдвиг, была предпринята попытка определения показателя (коэффициента) структурного ослабления лабораторным путем. Для этого вместо прочности пород на растяжение определяли прочность горных пород на прямой сдвиг по естественной поверхности ослабления  $\tau$ . Данные лабораторных испытаний проводились на примере тестирования образцов, взятых с золоторудного месторождения Гросс и Таборное, исследуемого профессором А.С. Вознесенским.

**Таблица 3.4**

| Номер образца | Прочность на прямой сдвиг, $\tau$ | Прочность на сжатие, $\sigma_{\text{сж}}$ | $\tau/\sigma_{\text{сж}}$ | $P_n$ | $K_c$ | $K_c - P_n$ |
|---------------|-----------------------------------|---|---------------------------|-------|-------|-------------|
| A1001         | 50                                | 170                                       | 0,29                      | 0,16  | 0,19  | 0,03        |
| A1008         | 40                                | 160                                       | 0,25                      | 0,13  | 0,155 | 0,03        |
| A1012         | 230                               | 820                                       | 0,28                      | 0,15  | 0,17  | 0,02        |
| A1017         | 150                               | 500                                       | 0,30                      | 0,16  | 0,19  | 0,03        |
| A2002         | 50                                | 170                                       | 0,29                      | 0,16  | 0,185 | 0,03        |
| A2004         | 50                                | 180                                       | 0,28                      | 0,15  | 0,165 | 0,02        |
| A2008         | 30                                | 125                                       | 0,24                      | 0,12  | 0,15  | 0,03        |
| A2011         | 280                               | 940                                       | 0,30                      | 0,16  | 0,19  | 0,03        |
| A2016         | 80                                | 290                                       | 0,28                      | 0,14  | 0,17  | 0,03        |

|       |     |      |      |      |       |      |
|-------|-----|------|------|------|-------|------|
| B1003 | 50  | 170  | 0,29 | 0,16 | 0,18  | 0,02 |
| B1008 | 290 | 1010 | 0,29 | 0,15 | 0,18  | 0,03 |
| B1011 | 370 | 1200 | 0,31 | 0,17 | 0,19  | 0,02 |
| B1015 | 170 | 530  | 0,32 | 0,18 | 0,19  | 0,01 |
| B1016 | 60  | 221  | 0,27 | 0,14 | 0,168 | 0,03 |
| A1003 | 420 | 1400 | 0,30 | 0,16 | 0,175 | 0,01 |
| A1005 | 280 | 1100 | 0,25 | 0,13 | 0,15  | 0,02 |

На основании полученных данных был построен график зависимости показателя неоднородности массива горных пород от отношения прочности пород на сдвиг к прочности пород на сжатие. Для этого по оси Y отложены значения показателя неоднородности массива горных пород  $P_n$ , а по оси X отношение прочности горных пород на сдвиг к прочности пород на сжатие Рис.3.5.



**Рис.3.5** График зависимости коэффициента структурного ослабления от отношения прочности пород на сдвиг к прочности пород на сжатие на месторождении Гросс и Таборное.

Учитывая указанную тенденцию, полученную на Рис.3.5, была получена кривая, которую можно аппроксимировать выражением вида:

$$P_H = d \times a \sqrt{\left( \frac{\tau}{\sigma_{сж}} \right)^{a-1}} \quad (3.21)$$

где:  $a = 3$

$$d = \tau / \sigma_{сж}$$

$P_H$  – показатель неоднородности массива горных пород;

$\tau$ . –прочность горных пород на сдвиг [МПа];

$\delta_{сж}$ .- предел прочности на сжатие [МПа];

Исходя из полевых наблюдений на карьере Таборное, по пустой породе отчетливо видна направленная трещиноватость с расстоянием между трещинами 5-20 см. Для рудных пород карьера характерно интенсивное развитие хаотической трещиноватости. Трещины извилистые, взаимно пересекающиеся, различной протяженности от первых сантиметров до нескольких метров. Насыщенность пород трещинами – высокая. Мощность трещин изменяется от нитевидных до 2-3 см. Открытые трещины, как правило, наиболее широкие и протяженные. Протяженность наиболее мощных трещин на прослеженных участках достигает 3-5 м. Согласно полевым наблюдениям среднее расстояние между поверхностями ослабления пород (трещинами) взятых непосредственно в рудных областях карьера составляет около 5 – 10 см. Согласно таблицы 1 пункта 2.16 СНиП II – 94 – 80, если среднее расстояние между поверхностями ослабления пород менее 0,1 м коэффициент структурного ослабления составляет  $K_c = 0,2$ . Таким образом, анализ приведенных данных показывает, что расхождение величин показателя (коэффициента) структурного ослабления, определенных по результатам инструментальных наблюдений и рассчитанных по выведенной зависимости составляют -0,01...-0,03 при среднем квадратическом отклонении  $\pm 0,002$  на месторождении Гросс и Табарное.

Безусловно, показатель неоднородности массива горных пород, определенный инженерно-геологическим путем непосредственно на самом месторождении, более точный, за счет того, что он учитывает в себе влияние масштабного эффекта. Однако, на месторождениях с неизученным характером процесса сдвижения массива горных пород, выражения (3.20) и (3.21) позволяет достаточно точно определить показатель неоднородности массива горных, что является наиболее актуальной задачей сегодняшнего времени.

Аналитические расчеты позволяют для конкретных условий получить единственное значение величины коэффициента структурного ослабления для определения прочности породного массива, а не принимать его по СНиПу. В свою очередь в классификации горных пород в массиве по трещиноватости по СНиПу приводятся значения коэффициента структурного ослабления, но данные значения являются частными значениями для типовых зданий и сооружений и удовлетворяют выражению  $K = \sqrt{l}$ , где  $l$  – среднее расстояние между поверхностью ослабления, поскольку используются без учета размеров выработки. Так как при проектировании развития горных работ необходимо знать не только среднее расстояние между поверхностями ослабления, но и размер выработки, т.е.  $K = \sqrt{l/L}$ , где  $L < 15\text{м.}$ , была выведена рекомендованная зависимость определения коэффициента структурного ослабления.

### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Строение массива горных пород характеризуется отношением их сопротивления растяжению и сдвигу к сопротивлению сжатия, а состояние – отношением нагрузки на элементы массива к сопротивлению этой нагрузке.
2. Установлена взаимосвязь показателя неоднородности массива горных пород с коэффициентом структурного ослабления, позволяющая определять свойства горных пород в массиве на основании материалов лабораторных исследований.
3. Доказано, что показатель неоднородности массива горных пород находится в следующей зависимости от отношения прочности пород на растяжение или на сдвиг к прочности пород на сжатие:

$$II_n = \lambda \times a \sqrt{\left( \frac{\sigma_{рас}}{\sigma_{сж}} \right)^{a-1}} \quad (1)$$

$$II_n = d \times a \sqrt{\left( \frac{\tau}{\sigma_{сж}} \right)^{a-1}} \quad (2)$$

где:  $a = 2$  и  $\lambda = \sigma_{рас}/\sigma_{сж}$  в выражении (1);

$a = 3$  и  $d = \tau/\sigma_{сж}$  в выражении (2).

4. Разница между показателями структурного ослабления, рассчитанного по выведенной зависимости и определенного в натуральных условиях, составляет 15-20%
5. Разработанная методика определения свойств, строения и состояния массива горных пород в лабораторных условиях позволяет получить

необходимые для проектирования предприятий исходные данные до начала горных работ на этих предприятиях.

6. Выдвинута и экспериментально подтверждена гипотеза о наличии подобия в структуре горных пород на микро- и макроуровнях.

## **4. УСТАНОВЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И СОСТАВЛЕНИЕ ИХ КЛАССИФИКАЦИИ**

### **4.1 О состоянии классификации месторождений полезных ископаемых**

Классификация – один из элементов методологического базиса любой науки. Значение классификации велико, в частности, как средства «свертывания информации», как средства для выработки и определения понятий, как эффективного средства организации познавательной деятельности. Классификация имеет также и огромное содержательное значение: она – своего рода зеркало, в весьма обобщенном виде отражающее содержание науки в целом или того раздела науки, к которому эта классификация относится. В науках по преимуществу описательных, в которых доля дедуктивно получаемого знания относительно невелика, разработке классификаций уделяется большое внимание.

Чем более развита описательная наука, чем больший объем информации охватывает классификация, тем больше классификация структурирована, иерархизирована. При этом исторически развитие классификации идет, как можно считать, и «вниз», все более детализируя разнообразие объектов классификации, и «вверх», модифицируя наиболее крупные классы классификации, классы верхних классификационных уровней.

При этом деление классифицируемых объектов на верхних уровнях классификации, как правило, исторически более устойчиво. Изменение верхних классов классификации происходит относительно редко (например, в классификации месторождений полезных ископаемых – примерно в течение 50 лет деление на верхних уровнях квазистабильно, в течение последующих 50 лет – происходит постепенная смена существующего деления новым, в течение еще 50 лет новое деление квазистабильно и так далее) [53].

Проблема классификации месторождений полезных ископаемых в первую очередь для верхних уровней этой классификации – проблема выделения

наиболее крупных, логически первоочередных разновидностей МПИ. При этом здесь еще не предлагается готовая классификация МПИ (хотя бы и на верхних уровнях), а лишь предпринимается попытка определить стратегию ее построения. Для некоторых фрагментов этой разносторонней и разноуровневой проблемы – как предмет для обсуждения – предлагаются возможные варианты решения или направления дальнейших разработок.

Основные методологические посылки, определяющие характер рассмотрения проблемы классификации МПИ, могут быть сведены, пожалуй, к следующим. При рассмотрении этой проблемы следует стремиться использовать имеющийся опыт классификации МПИ. В этом смысле будем исходить из критического анализа классификации МПИ Д.А. Казаковского [25; 26].

Обсуждая проблемы классификации, следует иметь ввиду в качестве необходимого (пусть и не достаточного) условия решения классификационных проблем некий норматив удовлетворительной классификации. Ранее [53] в качестве такого норматива был предложен следующий список требований, которым должна отвечать классификация: заданность классифицируемого множества, единство основания деления, непересекаемость классов, числовое выражение границ классов, соразмерность деления (равенство объёмов делимого множества и объединения выделенных его подмножеств), отсутствие «скачка» в делении (отсутствие неделящихся классов), применимость классификации к сложным (комбинаторным) объектам, операциональная значимость классификационного основания. Нами было рассмотрено две позиции этого списка: единство основания деления классификации и применимость классификации к сложным объектам.

Единство основания деления - это, вероятно, первоочередное требование к классификации. При создании классификации следует стремиться к нахождению свойства, по которому можно было бы выделять типы объектов на всём уровне классификации, а не в отдельных группах классов, относящихся к этому уровню. Кроме того, что это способствовало бы выявлению наиболее существенных свойств классифицируемых объектов [54].

Применимость классификации к сложным объектам, напротив, - особенность классификации, относительно редко являющаяся предметом внимания создателей классификации. Между тем, по какому бы свойству ни выделялись перечни непересекающихся между собой классов, всегда необходимо иметь ввиду возможность существования классов сложных, комбинаторных объектов, обладающих признаками нескольких классов. Так, например, если в классификации выделяются эндогенные и экзогенные МПИ, следует иметь существование эндогенно-экзогенных [54] месторождений, обладающих признаками и тех, и других. Но даже если в классификации не выделяются классы сложных объектов, всегда следует иметь возможность существования сложных - для данного перечня классов - объектов.

Основные содержательные послылки, из которых мы будем исходить при рассмотрении проблемы классификации МПИ - это необходимость очертить круг исходных понятий и определить их, а также определить относительный приоритет характеристик (групп характеристик) месторождения полезного ископаемого в качестве возможного основания классификации МПИ.

#### **4.2 Оценка состояния классификаций критериев подобия месторождений полезных ископаемых**

Свойства массивов горных пород достаточно разнообразны, и для описания их характеристик возникла необходимость систематизации и сведения к общему числовому показателю [42].

Классификации массивов являются основой эмпирического подхода к проектированию различных сооружений в массивах и нашли в этой области широкое распространение.

Целью введения первых таких классификаций было объединение усилий геологов и горных инженеров для принятия решений по выбору крепления выработок на основе свойств массива. Использование расчетных рейтинговых

показателей массивов, на основе полученных геомеханических данных дает возможность обосновать первоначальные проектные решения с дальнейшей их корректировкой по мере получения новых данных.

Необходимо понимать, что использование классификаций не может заменить более тщательно разрабатываемые проекты технологических процессов на основе детальных данных. Тем не менее, использование этих проектных систем требует наличие относительно детальной информации о давлении в нетронутом массиве, свойствах массива горных пород и возможном порядке отработки, которая не доступна на ранних стадиях проектирования. Как только данная информация становится доступной, можно пересмотреть схему классификации массива горных пород и использовать ее в сочетании с более детальным анализом характеристик. Применение классификаций горных массивов по критериям их устойчивости насчитывает более 100 лет.

Разработкой классификаций массивов горных пород занимались такие ученые, как Протодьяконов, Дир (RQD), Мюллер, Франклин, Терцаги, Лин, Ланди, Бартон, Бенявски (RMR), Романа (SMR), Лобшир (MRMR), Булычев, Агошков М.И. [42,75 и др].

Одной из первых попыток соотнести показатели устойчивости массивов горных пород к принятию определенных решений на их основе была сделана в 1879 году Риттером. Он с позиций теории упругости определял параметры свода естественного равновесия и пытался объяснить явление сводообразования и определения допустимых пролетов незакрепленной кровли горизонтальных выработок. Основной вклад Риттера заключался в предложении применить общий подход к проектам проходки выработок, в частности определению требований к системам крепления, на основе опытных данных.

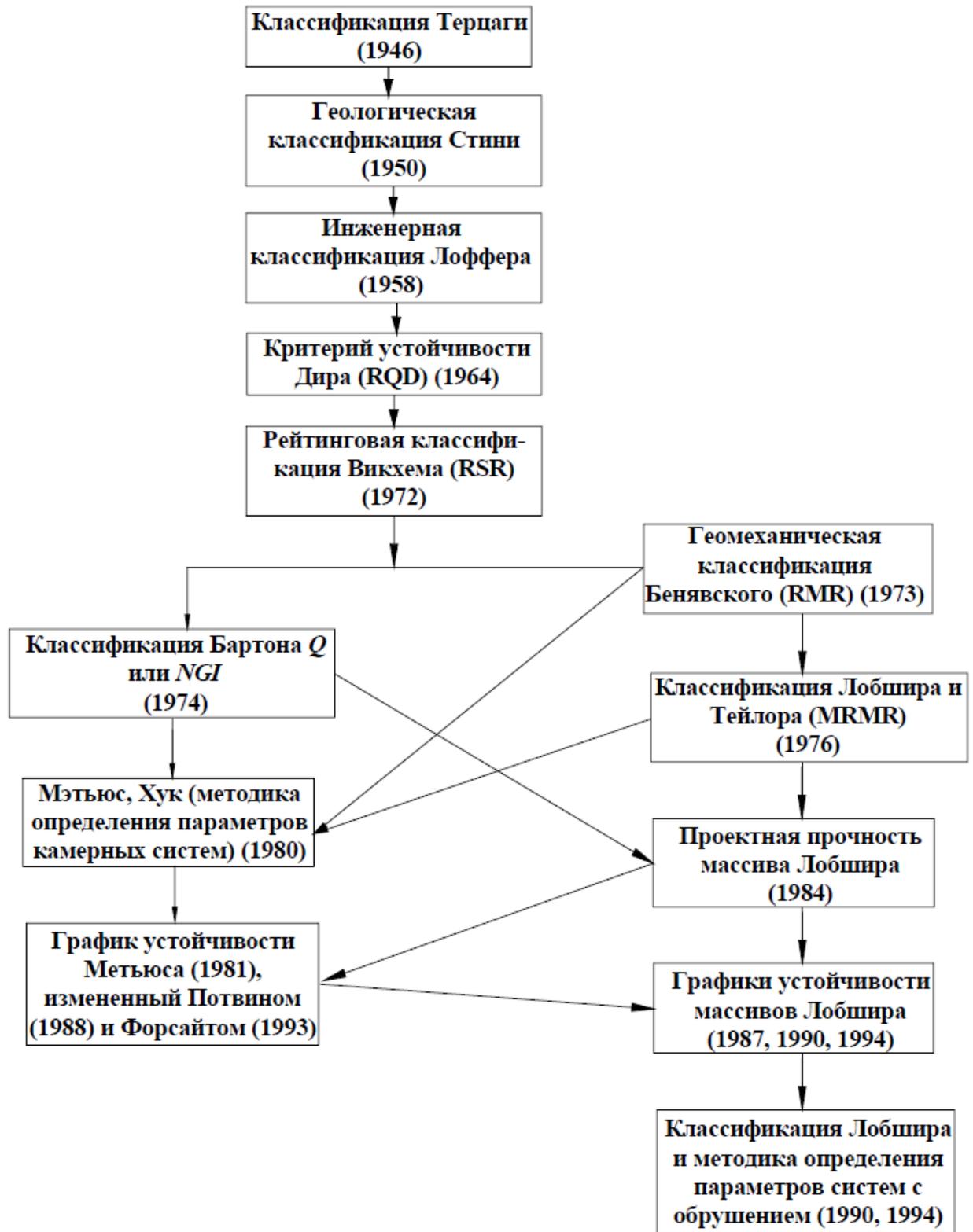
Его теория не нашла практического применения из-за того, что она применима в весьма ограниченном числе случаев.

Ранние упоминания использования классификации массивов для выбора крепи выработок имеются в работе Терцаги (1946), где нагрузка на несущие

оклады крепи оценивается на основе описывающей массив классификации. В настоящее время она практически не используется, но основное внимание в ней Терцаги уделяет характеристикам, которые имеют наиболее предопределяющее влияние на устойчивость массивов.

В 1958 г. Лоффер предположил, что время устойчивости для определенного пролета обнажения можно соотнести с геомеханическими характеристиками породы. В его классификацию были внесены изменения многими учеными, и сейчас она является частью подхода к проведению выработок. Одна из самых значительных концепций в его работе заключается в том, что увеличение пролета обнажения приводит к значительному сокращению времени устойчивости до установки крепи.

В 1967 г. Диром был предложен критерий устойчивости массива по данным кернового бурения названный «Индекс качества породы» (RQD). Показатель определяется как отношение общей длины кусков керна (длиной более 10 см) к общей его длине, где RQD - показатель, имеющий прямо пропорциональную зависимость от числа трещин и его значение может значительно изменяться в зависимости от направления бурения. Использование подсчета трещин в объеме массива уравнивает данную анизотропию и дает более наглядную оценку. Критерий Дира широко использовался в течение 25 лет для определения допустимого давления и выбора крепления, а в настоящее время, этот показатель, является существенным компонентом при подсчете рейтинговых показателей в других классификациях. Показатель трещиноватости, который лежит в основе данной классификации, имеет очень высокую степень влияния на устойчивость обнажений горных пород. В нашей стране также имеются методики расчета параметров крепей, в которых трещиноватость рассматривается как основной фактор. В работах С.В. Ветрова, С.Н. Чернышева четко определены основные термины и характеристики трещиноватости. Однако, как показывает практика, трещиноватость является одним из основных влияющих на устойчивость факторов, но не единственным, поэтому в дальнейшем стали появляться классификации, учитывающие сразу несколько параметров для оценки



*Рис. 4.1 Развитие классификаций массивов по устойчивости.*

устойчивости массивов. В настоящее время, этот показатель, является существенным компонентом при подсчете рейтинговых показателей в других классификациях.

В 1972 г. Викхем предложил использовать количественный метод для описания качественных характеристик массива и для выбора соответствующего крепления на основе классификации RSR. В данной классификации продемонстрировано логическое направление в развитии систем количественной оценки массива горных пород. Это одна из первых попыток внедрения рейтинговых показателей в описание массивов. Рейтинг RSR складывается из трех составляющих:  $RSR = A+B+C$ . Параметр А представляет общую оценку геологического строения, В - учитывает влияние трещиноватости массива по отношению к направлению проведения выработки, С - влияние подземных водопритоков и трещиноватости. По графикам подбирали соответствующее крепление. В настоящее время RSR практически не используется, однако эта система являлась еще одним шагом в эволюции классификаций массивов.

В 1973 г. Бенявский предложил рейтинговый критерий устойчивости массива. В 1976 г. он опубликовал классификацию массивов горных пород, названную геомеханической классификацией или рейтингом массива горных пород (RMR). Одна из последних версий RMR была принята в 1989 г.

В классификации массивов используются следующие 6 параметров - прочность пород на одноосное сжатие; показатель качества пород RQD; расстояние между трещинами; условия трещиноватости; наличие подземных водопритоков; ориентация трещин.

Система RMR Бенявского основывалась на примерах подземного строительства гражданских сооружений, поэтому возникла необходимость составить специальную классификацию для горнодобывающей промышленности. Вследствие этого классификация была модифицирована и дополнена для возможности использования в горном деле.

Кендорским был изменен рейтинг Бенявского для практического его использования для систем с обрушением. Система получила распространение в США.

Лобшир (1977, 1984), Лобшир и Тейлор (1976) и Лобшир и Пейдж (1990) привели описание системы «горного рейтинга массива горных пород» (MRMR). Она базируется на RMR, но в нее были также внесены дополнительные параметры влияния давления нетронутого массива и привнесенного давления, изменения давления, влияния взрывных работ и выветривания.

Необходимость систематизации и сведения к общему числовому показателю разрозненных данных описания характеристик массива возникла вследствие большого разнообразия свойств горных массивов. Между тем геомеханическое состояние массива горных пород входит в число основных исходных данных, на базе которых выбираются система разработки и ее параметры, виды крепи горных выработок и способы управления горным давлением, методы охраны сооружений поверхности и другие технические решения для месторождений с неизученными параметрами сдвига.

### **4.3 Классификация горных пород в массиве по прочности**

Очень часто в горной литературе используется понятие прочность горных пород. Прочность - свойство горных пород в определённых условиях, не разрушаясь, воспринимать воздействия механических нагрузок, температурных, магнитных, электрических и др. полей, неравномерное протекание физико-химических процессов в разных частях горных пород и др.

Различают прочность: теоретическую - вычисленную на основе учёта сил межатомного сцепления; статическую - свойство горных пород воспринимать кратковременную нагрузку, приложенную с постоянной скоростью; динамическую - свойство воспринимать, не разрушаясь, динамическую нагрузку; длительную - прочность горных пород, находящихся длительное время под нагрузкой; остаточную - уровень сохранившейся несущей способности разрушенной горной породы, равный соответствующим минимальным напряжениям при данной величине деформации, который породе

выдерживает без дальнейшего деформирования и разрушения; электрическую - определяемую значениями напряжения пробоя.

Показателями, характеризующими прочность горных пород для различных случаев, являются: пределы прочности пород на сжатие  $B_{сж}$ , растяжение  $B_p$ , сдвиг  $\tau_{сдв}$ , изгиб  $\tau_{изг}$ , а также текучести  $B_{тек}$ , ползучести  $B_{полз}$  и др. Для большинства пород  $B_p$  не превышают 20 МПа и составляют примерно (0,1 - 0,02)  $B_{сж}$ . Пределы прочности пород при сдвиге, изгибе и др. видах деформаций всегда меньше  $B_{сж}$  и больше  $B_p$ , но более близки к последнему.

Для инженерных расчетов следует иметь в виду, что предел прочности массива значительно (в десятки, иногда сотни раз) меньше установленных пределов на образцах в лаборатории из-за наличия различных макронарушений.

Теория прочности разрабатывалась многими выдающимися учёными, среди которых были Проскуряков, Кулон, Кошелев, Мор, Протодьяконов и др.[59,35,17] Анализ литературы показал, что с увеличением глубины разработки деление пород на слабые, прочные и т.д. претерпевает изменения. В этой связи нет единой классификации горных пород в массиве по прочности. Так в работе Н.М. Проскурякова [59] приводится одна из классификаций вмещающих горных пород по прочности на одноосное сжатие  $B_{сж}$  (табл.4.1).

**Таблица 4.1**

**Классификация горных пород по прочности по Н.М. Проскурякову.**

| Тип вмещающих пород | Диапазон изменения $B_{сж}$ , МПа |
|---------------------|-----------------------------------|
| Слабые              | 25–30                             |
| Средней прочности   | 40–80                             |
| Прочные             | 80–120                            |
| Весьма прочные      | >120                              |

Несколько другие значения приводятся Кошелевым К.В. и др. [35] (табл. 4.2).

Таблица 4.2

*Классификация прочности горных пород по К.В. Кошелеву.*

| Группа пород     | $\sigma_{сж}$ , МПа | $f$    |
|------------------|---------------------|--------|
| Слабые           | < 40                | < 4    |
| Средней крепости | 41–70               | 4–7    |
| Крепкие          | 71–100              | 7,1–10 |
| Весьма крепкие   | > 100               | > 10   |

В обеих классификациях используется один и тот же параметр - предел прочности на одноосное сжатие –  $\sigma_{сж}$ . Проскуряков Н.М. к слабым относит породы с  $\sigma_{сж} = 25 \div 30$  МПа, а к породам средней прочности – с  $\sigma_{сж} = 40 \div 80$  МПа, т.е. имеется разрыв в диапазоне от 30 до 40 МПа. С учетом выше сказанного для глубин 800-1200 м можно пользоваться классификацией, приведенной в табл. 4.3

Таблица 4.3

*Классификация горных пород в массиве по прочности.*

| Тип вмещающих пород по прочности | $\sigma_{сж}$ , мПа |
|----------------------------------|---------------------|
| Слабые                           | До 40               |
| Средней прочности                | 40–80               |
| Прочные                          | 80–120              |
| Весьма прочные                   | Более 120           |

Проф. М. М. Протоdjяконов в 1908 г. опубликовал классификацию крепости пород, в основе которой лежит их прочность на сжатие [60; 17]. Это была первая научнообоснованная классификация пород, позволившая подсчитывать затраты труда и материалов при ведении горных работ.

Согласно классификации проф. М. М. Протодяконова (табл. 4.4), горные породы разделены на десять категорий, причем категории III, IV, V, VI и VII имеют две подкатегории.

Коэффициентом крепости  $f$  проф. М. М. Протодяконов назвал величину временного сопротивления сжатию. Этот коэффициент характеризует относительную прочность породы и входит во многие эмпирические формулы, предложенные проф. М. М. Протодяконовым [17].

$$f = \frac{\sigma_{сж}}{100} \quad \text{или} \quad f = \frac{\sigma_{сж}}{10}$$

где:  $\sigma_{сж}$  – в первом случае в [кг/см<sup>2</sup>], во втором в – [МПа].

Более точно величину  $f$  можно определить по выражению

$$f = \frac{\sigma_{сж}}{30} + \sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{3}}$$

**Таблица 4.4**

***Классификация горных пород по крепости (шкала М.М. Протодяконова).***

| Категория | Степень крепости          | Горные породы                                 | Коэффициент крепости, $f$ |
|-----------|---------------------------|---|---------------------------|
| 1         | 2                         | 3   | 4                         |
| I         | В высшей степени крепости | Кварциты, базальты и др.                      | 20                        |
| II        | Очень крепкие             | Граниты, порфиры, песчаники                   | 15                        |
| III       | крепкие                   | Граниты, песчаники, известняки                | 8 - 10                    |
| IV        | Довольно крепкие          | Песчаники, сланцы, железные руды              | 5 - 6                     |
| V         | средние                   | Некрепкие песчаники и сланцы, плотный мергель | 3 - 4                     |

|        |                                   |   |         |
|--------|-----------------------------------|---|---------|
| VI - X | Довольно мягкие, сыпучие, пльвуны | Мягкие сланцы, мел, глины, пески, пльвуны | 0,3 - 2 |
|--------|-----------------------------------|---|---------|

Анализ всех названных классификаций позволяет сделать вывод, что в рассмотренных классификациях горных пород в массиве на прочность используется один и тот же параметр - предел прочности на одноосное сжатие –  $\sigma_{сж}$ . Проскураков Н.М. к слабым относит породы с  $\sigma_{сж} = 25 \div 30$  МПа, а к породам средней прочности – с  $\sigma_{сж} = 40 \div 80$  МПа, т.е. имеется разрыв в диапазоне от 30 до 40 МПа. В приведенной классификации М.М. Протождяконов к крепким пород относит -  $\sigma_{сж} = 50 \div 100$  МПа, а к породам очень крепким -  $\sigma_{сж} = 150$  МПа, т.е. имеется разрыв от 100 до 150 МПа. Приняв за основу все выше приведенные классификации, составим сводную таблицу классификаций горных пород в массиве по прочности (табл. 4.5). В рекомендуемой классификации сделан плавный переход от одного типа вмещающих пород к другому, без каких либо разрывов в числовых значениях предела прочности на одноосное сжатие. Это в свою очередь позволит с большей вероятностью определить принадлежность горных пород к тому или иному по прочности типу горных пород.

#### 4.4 Классификация горных пород в массиве по трещиноватости.

##### Коэффициент структурного ослабления

Трещины в горных породах составляют сложные пространственные сети. Строение сетей трещин определяет деформационные, прочностные, фильтрационные свойства массивов горных пород и слоистых толщ, закономерности размещения и технологию разработки месторождений многих полезных ископаемых.

Трещиноватость горных пород - это совокупность трещин различного происхождения и различных размеров, формы и пространственной ориентировки. Трещиной называют разрыв сплошности среды, величина которого на порядок и

более превосходит межатомные расстояния в кристаллической решетке (т.е. более  $10^{-9}$  м).

По происхождению трещиноватость горных пород разделяется на нетектоническую, тектоническую и планетарную. Нетектоническая трещиноватость горных пород – это следствие растрескивания горных пород в процессе охлаждения (для магматических пород), уплотнения, дегидратации (для осадочных ГП). К нетектонической трещиноватости относится также технологическая трещиноватость, вызванная ведением горных работ, трещиноватость горных пород в зоне влияния горной выработки, вызванная БВР, горным давлением и т.д.

Тектоническая трещиноватость развивается в горных породах в связи с тектоническими процессами, т.е. вызывается горо- и складкообразованием, глубинными подвижками платформ.

Планетарная трещиноватость связана с напряжениями, вызванными изменением частоты вращения Земли и ее формы. Существует большое количество классификаций трещиноватости горных пород. Так, Н.М. Проскуряков выделяет естественную трещиноватость, т.е. трещины, возникшие в горных породах без влияния горных работ, и технологические или эксплуатационные, т.е. трещины, образовавшиеся в боковых породах под влиянием очистной выемки. При этом естественная трещиноватость включает трещины кливажа и тектоническую трещиноватость.

Исходя из ориентации трещин относительно напластования, линии очистного забоя и взаимного расположения систем трещин Н.М. Проскуряков выделяет одиннадцать групп трещин. Устойчивость кровли в лаве предлагает оценивать количественно коэффициентами вывалообразования, уступообразования и коэффициентом трещиноватости кровли, равным

*Классификация горных пород в массиве по прочности.*

| Тип вмещающих пород по прочности |                     |                                      |                            | Коэффициент крепости, $f$ |                  |                           |                   |
|----------------------------------|---------------------|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|-------------------|
| Н.М.<br>Проскурякову             | К.В. Кошелеву       | М.М.<br>Протодяконова                | Рекомендуемая              | Н.М.<br>Проскурякову      | К.В.<br>Кошелеву | М.М.<br>Протодякон<br>ова | Рекомендуем<br>ая |
| Слабые                           | Слабые              | Довольно мягкие,<br>сыпучие, пливуны | Очень низкая<br>прочность  | 2,5–3                     | < 4              | 0,3 - 2                   | $\leq 2,0$        |
| Средней<br>прочности             | Средней<br>крепости | средние                              | Низкая<br>прочность        | 4–8                       | 4,1–7            | 3 - 4                     | 2,1 – 5,0         |
| Прочные                          | Крепкие             | крепкие                              | Средняя<br>прочность       | 8–12                      | 7,1–10           | 5-10                      | 5,1 – 10,0        |
| Весьма прочные                   | Весьма<br>крепкие   | Очень крепкие                        | Высокая<br>прочность       | >12                       | > 10             | 15                        | 10,1 – 15,0       |
| -                                | -                   | В высшей степени<br>крепости         | Очень высокая<br>прочность | -                         | -                | 20                        | $\geq 15,1$       |

$$K_T = \frac{\sum l_T}{S_0} \quad (4.1)$$

где:  $K_T$  – коэффициент трещиноватости кровли;

$\sum l_T$  – суммарная протяженность видимых трещин на участке призабойного пространства, охваченного трещинами, [м];

$S_0$  – площадь этого участка, [м].

В.В. Ржевский и Г.Я. Новик классифицируют трещины по следующим пяти признакам: степени раскрытия, размерам, форме, геометрическому взаимоотношению трещин со слоистостью и углу наклона к горизонтали [64]. В справочниках взрывника и по креплению горных выработок приводятся также несколько отличные классификации горных пород по трещиноватости (таблица 4.6). В указаниях ВНИМИ приводится классификация горных пород в зависимости от интенсивности трещиноватости, то есть от размеров кусков, на которые делится керн или что то же – от расстояния между трещинами. Чем интенсивнее трещиноватость, тем меньше значение коэффициента структурного ослабления массива  $K_C$ .

**Таблица 4.6**

***Классификация горных пород в массиве по степени трещиноватости по В.В. Ржевскому.***

| Категория трещиноватости пород | Степень трещиноватости (блочности) пород  | Среднее расстояние между естественными трещинами всех систем, м |
|--------------------------------|---|---|
| I                              | Чрезвычайно трещиноватые (мелкоблочные)   | До 0.1  |
| II                             | Сильно трещиноватые (среднеблочные)       | 0.1 - 0.5   |
| III                            | Среднетрещиноватые (весьма крупноблочные) | 0.5 - 1.0   |

|    |  |           |
|----|--|-----------|
| IV | Малотрещиноватые (весьма крупноблочные)              | 1.0 - 1.5 |
| V  | Практически монолитные (исключительно крупноблочные) | Свыше 1.5 |

Необходимо отметить, что Указания ВНИМИ 1986 года издания дают значения  $K_C$  несколько выше, чем по СНиПу (таблица 4.7).

**Таблица 4.7**

***Классификация горных пород в массиве по трещиноватости по СНиПу.***

| Категория пород по трещиноватости | Расстояние между поверхностями ослабления $l$ , м | Коэффициент структурного ослабления, $K_C$ . |
|-----------------------------------|---|--|
| Практически монолитные            | >1,0  | 0,9  |
| Малотрещиноватые                  | 0,5 - 1,0   | 0,8  |
| Среднетрещиноватые                | 0,3 - 0,5   | 0,6  |
| Трещиноватые                      | 0,1 - 0,3   | 0,4  |
| Весьма трещиноватые               | <0,1  | 0,2  |

Из всего выше сказанного вытекает, что в настоящее время нет единой классификации горных пород в массиве по трещиноватости. В.В. Ржевский приводит классификацию трещин по следующим пяти признакам: степени раскрытия, размерам, форме, геометрическому взаимоотношению трещин со слоистостью и углом наклона к горизонтали. В классификации В.В. Ржевского приводятся значения среднего расстояния между поверхностями ослабления, но нет никаких упоминаний о коэффициенте структурного ослабления. Поскольку состояние массива горных пород характеризуется коэффициентом структурного ослабления, то данный показатель должен быть ключевым в составлении

классификации. В свою очередь в классификации горных пород в массиве по трещиноватости по СНиПу приводятся значения коэффициента структурного ослабления, но данные значения являются частными значениями для типовых зданий и сооружений и удовлетворяют выражению  $K = \sqrt{l}$ , где  $l$  – среднее расстояние между поверхностью ослабления, поскольку используются без учета размеров выработки. Так как при проектировании развития горных работ необходимо знать не только среднее расстояние между поверхностями ослабления, но и размер выработки, т.е.  $K = \sqrt{l/L}$ , где  $L < 15\text{м.}$ , была составлена рекомендованная классификация состояния массива горных пород применяемая не только для зданий и сооружений, но и для месторождений с неизученным характером процесса сдвижения.

Таким образом, анализ всех названных классификаций позволяет принять для практических целей классификацию горных пород в массиве по трещиноватости, дополненную названиями категорий пород (табл. 4.8).

#### **4.5 Определение состояния массива горных пород. Сведение всех классификаций к единой классификации**

В настоящее время получили распространение классификации скальных массивов, позволяющие по ряду признаков дать общую оценку массиву и получить некоторые прогнозные характеристики поведения пород. При проектировании тоннелей за рубежом пользуется популярностью геомеханическая классификация скальных массивов проф. З. Беньявского (Bieniawski) таблица 4.9 [83]. Эта классификация содержит, в частности, и оценку устойчивости кровли тоннеля.

Таблица 4.9

| Категория устойчивости | Степень устойчивости | Значение показателя S | Характеристика состояния пород                |
|------------------------|----------------------|-----------------------|---|
| I                      | Вполне устойчивые    | >70                   | Вывалы и отслоения отсутствуют                |
| II                     | Устойчивые           | 5-70                  | Возможны отдельные отслоения                  |
| III                    | Средней устойчивости | 1-5                   | Возможно образование вывалов из кровли        |
| IV                     | Неустойчивые         | 0,05-1,00             | Вывалы вскоре после обнажения, вывалы в боках |
| V                      | Весьма неустойчивые  | <0,05                 | Обрушение вслед за обнажением                 |

Устойчивость пород (степень склонности их к вывалообразованию и обрушению в выработку) оценивается по величине показателя S (табл. 4.9), определяемого по формуле [10;11]:

$$S = f \frac{K_M}{K_N} \frac{K_R K_w}{K_t K_A K_a} \quad (4.2)$$

где:  $f$ -коэффициент крепости пород по М. М. Протодяконову;  $K_M$  - коэффициент, характеризующий влияние степени трещиноватости пород;  $K_N$  - коэффициент, учитывающий число систем трещин;  $K_R$  - коэффициент, характеризующий влияние шероховатости стенок трещин;  $K_w$  - коэффициент, учитывающий увлажнение пород;  $K_t$  - коэффициент, характеризующий влияние раскрытия незаполненных трещин;  $K_A$  - коэффициент, учитывающий заполнение трещин раздробленной породой или вторичными минералами;  $K_a$  - коэффициент,

*Классификация горных пород в массиве по трещиноватости*

| Категория пород по трещиноватости по методам:        |                        |                     | Расстояние между поверхностями ослабления по методу $l$ , м |           |               | Коэффициент структурного ослабления, $K_c$ . |      |               |
|--|------------------------|---------------------|---|-----------|---------------|--|------|---------------|
| В.В. Ржевского                                       | СНиП                   | Рекомендуемая       | В.В. Ржевского  | СНиП      | Рекомендуемая | В.В. Ржевского                               | СНиП | Рекомендуемая |
| Чрезвычайно трещиноватые (мелкоблочные)              | Весьма трещиноватые    | Сильно трещиноватое | До 0,1  | <0,1      | $\leq 0,1$    | -  | 0,2  | 0,2           |
| Сильно трещиноватые (среднеблочные)                  | Трещиноватые           | Трещиноватое        | 0,1 – 0,5   | 0,1 - 0,3 | 0,2– 0,3      | -  | 0,4  | 0,4           |
| Среднетрещиноватые (весьма крупноблочные)            | Среднетрещиноватые     | Блочное слоистое    | 0,5 – 1,0   | 0,3 - 0,5 | 0,4- 0,5      | -  | 0,6  | 0,6           |
| Малотрещиноватые (весьма крупноблочные)              | Малотрещиноватые       | Блочное             | 1,0 – 1,5   | 0,5 - 1,0 | 0,6 – 0,9     | -  | 0,8  | 0,8           |
| Практически монолитные (исключительно крупноблочные) | Практически монолитные | Монолитное          | Свыше 1,5   | >1,0      | 1,0           | -  | 0,9  | 1,0           |

учитывающий ориентировку выработки относительно наиболее развитой системы трещин.

Наряду с классификациями общего характера, к числу которых относится классификация З. Бенявского [83], целесообразно иметь классификации и методы прогноза конкретных форм поведения пород.

Геомеханическое состояние массива определяется, прежде всего, отношением нагрузки на горную породу к ее прочности. При одной и той же прочности пород это отношение, в зависимости от глубины, может меняться в несколько раз, что необходимо учитывать, особенно при современных глубинах разработки месторождений полезных ископаемых. На основании выше указанной классификации, определение состояния массива горных пород сведены в общую таблицу 4.9

Трудность решения задачи количественной оценки устойчивости пород при сооружении открытых или подземных горных выработок на месторождениях с неизученным характером сдвижения в горноскладчатых областях аналитическими методами привела к необходимости использования метода аналогий. Сущностью метода является выявление соответствия между объектом (прототипом) и его аналогом и перенесение важных для прогноза качеств с аналога на прототип. Учитывая адекватность протекания инженерно-геологических процессов и механизма их проявления, можно сделать вывод об аналогии объектов: “от сходства действия к сходству причин”. Общность инженерно- геологических процессов предопределяет единство инженерно-геологических условий аналога и прототипа.

В нашем случае прогнозирование устойчивости пород методом аналогии заключается в сопоставлении модели развития инженерно-геологических процессов в изучаемой геосистеме с информацией, полученной в результате детального анализа подобной геосистемы-аналога.

Таблица 4.10

| Степень устойчивости массива горных пород |                         |
|---|-------------------------|
| 3. Беньявского                            | Рекомендуемая           |
| Вполне устойчивые                         | Весьма устойчивое       |
| Устойчивые                                | Устойчивое              |
| Средней устойчивости                      | Допустимая устойчивость |
| Неустойчивые                              | Предельное состояние    |
| Весьма неустойчивые                       | Запредельное состояние  |

Процесс прогнозирования методом аналогий рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

- поиск и изучение объекта-аналога;
- выбор критериев геологического подобия;
- перенос информации с аналога на объект прогноза.

В случае прогноза инженерно-геологических условий отработки месторождений полезных ископаемых поиск аналога подразумевает нахождение эксплуатируемых месторождений, которые по геологическим признакам сходны с изучаемым. Точность прогноза по методу аналогий должна определяться степенью сходства условий изучаемого объекта и аналога. Использование метода аналогий наиболее эффективно на стадиях изучения месторождения и проектирования горнорудного предприятия.

Доказательства подобия рассматриваются, как правило, на качественном уровне. Критерии геологического подобия выводятся на основании изучения

основных факторов, определяющих физическую природу объекта. Поэтому обоснованность выводов прогноза целиком зависит от количества и значимости выбранных критериев.

Прогнозную оценку методом аналогий целесообразно выполнять в 2 этапа:

1 этап – выбор факторов, определяющих физическую природу объекта;

2 этап – обоснование критериев подобия (однозначности).

Следующим важным этапом прогнозной оценки является доказательство аналогии, обоснование критериев подобия. Критерии подобия определяют на основе качественной оценки и количественного анализа.

В качестве количественных критериев подобия могут быть использованы: показатели физико-механических свойств; степень трещиноватости; интенсивность инженерно-геологических процессов и т.д.

Нами для подбора месторождений – аналогов для месторождений с неизученным характером процесса сдвижения использовались в основном количественные критерии подобия. Из значительного набора количественных критериев подобия были выбраны следующие основные критерии, определяющие устойчивость массива горных пород при разработке месторождений с неизученным характером процесса сдвижения:

1. Прочностные свойства;
2. Состояние массива;
3. Строение массива;
4. Глубина залегания полезного ископаемого;
5. Угол падения пласта;
6. Мощность пласта;
7. Размер выработанного пространства.

Остановимся подробно на каждом из перечисленных групп критериев подобия на месторождениях с неизученным характером процесса сдвижения.

Общепринято считать, что прочность – это свойство материала сохранять свою сплошность при деформации в процессе нагружения. В данной классификации прочность пород подразделяется на пять подгрупп:

1. Очень низкая прочность

Коэффициент крепости горных работ равен  $f \leq 2,0$

2. Низкая прочность

Коэффициент крепости горных работ изменяется в диапазоне от  $f = 2,1 \div 5,0$

3. Средняя прочность

Коэффициент крепости горных работ изменяется в диапазоне от  $f = 5,1 \div 10,0$

4. Высокая прочность

Коэффициент крепости горных работ изменяется в диапазоне от  $f = 10,1 \div 15,0$

5. Очень высокая прочность

Коэффициент крепости горных работ равен  $f \geq 15,1$

Геомеханическое состояние массива определяется, прежде всего, отношением нагрузки на горную породу к ее прочности. При одной и той же прочности пород это отношение, в зависимости от глубины, может меняться в несколько раз, что необходимо учитывать, особенно при современных глубинах разработки месторождений полезных ископаемых. Состояние массива горных пород подразделяется на:

1. Весьма устойчивое

Таблица 4.11

| Прочность пород   | Состояние массива   | Строение массива  | Глубина                               |
|---|---|---|---------------------------------------|
| Очень низкая прочность<br>$f \leq 2,0; \delta_0 = 55^0$   | Запредельное состояние<br>$\frac{\gamma H}{\delta_{сж}} \geq 2,1$     | Сильнотрещиноватое<br>$K_c \leq 0,3; \frac{\delta_{рас.}}{\delta_{сж}} \leq 0,2; \frac{\tau}{\delta_{сж}} \leq 0,3$ | Малая глубина<br>$H \leq 100$ м.      |
| Низкая прочность<br>$f = 2,1 - 5,0; \delta_0 = 65^0$      | Предельное состояние<br>$\frac{\gamma H}{\delta_{сж}} = 1,6 - 2,0$    | Трещиноватое<br>$K_c = 0,4 - 0,3; \frac{\delta_{рас.}}{\delta_{сж}} = 0,4; \frac{\tau}{\delta_{сж}} = 0,5$          | Неглубокая<br>$H = 101 - 400$ м.      |
| Средняя прочность<br>$f = 5,1 - 10,0; \delta_0 = 70^0$    | Допустимая устойчивость<br>$\frac{\gamma H}{\delta_{сж}} = 1,1 - 1,5$ | Блочно - слоистое<br>$K_c = 0,6 - 0,5; \frac{\delta_{рас.}}{\delta_{сж}} = 0,6; \frac{\tau}{\delta_{сж}} = 0,7$     | Средняя глубина<br>$H = 401 - 600$ м. |
| Высокая прочность<br>$f = 10,1 - 15,0; \delta_0 = 75^0$   | Устойчивое<br>$\frac{\gamma H}{\delta_{сж}} = 0,6 - 1,0$              | Блочное<br>$K_c = 0,9 - 0,7; \frac{\delta_{рас.}}{\delta_{сж}} = 0,8; \frac{\tau}{\delta_{сж}} = 0,9$               | Глубокая<br>$H = 601 - 1000$ м.       |
| Очень высокая прочность<br>$f \geq 15,1; \delta_0 = 80^0$ | Весьма устойчивое<br>$\frac{\gamma H}{\delta_{сж}} \leq 0,5$          | Монолитное<br>$K_c = 1,0; \frac{\delta_{рас.}}{\delta_{сж}} = 1,0; \frac{\tau}{\delta_{сж}} = 1,0$                  | Сверхглубокая<br>$H > 1000$ м.        |

Степень устойчивости массива горных пород оценивается отношением нагрузки на горную породу к ее прочности и описывается выражением

следующего вида  $\frac{\gamma H}{\delta_{сж}} \leq 0,5$

## 2. Устойчивое

При устойчивом состоянии массива горных пород, отношение нагрузки горных

пород к ее прочности изменяется в диапазоне  $\frac{\gamma H}{\delta_{сж}} = 0,6 \div 1,0$

## 3. Допустимая устойчивость

При допустимой устойчивости состоянии массива горных пород, отношение нагрузки горных пород к ее прочности изменяется в диапазоне

$$\frac{\gamma H}{\delta_{сж}} = 1,1 \div 1,5$$

## 4. Предельное состояние

При предельном состоянии массива горных пород, отношение нагрузки

горных пород к ее прочности изменяется в диапазоне  $\frac{\gamma H}{\delta_{сж}} = 1,6 \div 2,0$

## 5. Запредельное состояние

И, наконец, при запредельном состоянии массива горных пород, отношение

нагрузки горных пород к ее прочности изменяется в диапазоне  $\frac{\gamma H}{\delta_{сж}} \geq 2,1$

В данной классификации показателем характеризующим состояние и строение массива горных пород является отношение нагрузки на массив к сопротивлению этой нагрузке, отношения временного сопротивления растяжения или сдвига к временному сопротивлению сжатия. В данной классификации прочность пород подразделяется на пять подгрупп:

$$1. \text{ Монолитное } K_c = 1,0; \frac{\delta_{рас.}}{\delta_{сж}} = 1,0; \frac{\tau}{\delta_{сж}} = 1,0$$

$$2. \text{ Блочное } K_c = 0,9 \div 0,7; \frac{\delta_{рас.}}{\delta_{сж}} = 0,8; \frac{\tau}{\delta_{сж}} = 0,9$$

Общая структура массива горных пород представляется в виде вложенных друг в друга структурных блоков.

$$3. \text{ Блочно – слоистое } K_c = 0,6 \div 0,5; \frac{\delta_{рас.}}{\delta_{сж}} = 0,6; \frac{\tau}{\delta_{сж}} = 0,7$$

$$4. \text{ Трещиноватое } K_c = 0,4 \div 0,3; \frac{\delta_{рас.}}{\delta_{сж}} = 0,4; \frac{\tau}{\delta_{сж}} = 0,5$$

$$5. \text{ Сильно трещиноватое } K_c \leq 0,3; \frac{\delta_{рас.}}{\delta_{сж}} \leq 0,2; \frac{\tau}{\delta_{сж}} \leq 0,3$$

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

Составлена классификация критериев подобия месторождений осадочного происхождения, базирующаяся на использовании критериев, в число которых входят, прежде всего, строение и состояние массива горных пород, которые в ранее составленных классификациях не учитывались. Для блочно-слоистого массива горных пород, какими являются массивы на большинстве месторождений, определяющими факторами прочности являются структура и строение массива. Строение массива по составленной классификации подразделяется:

- на монолитное;
- блочное;
- блочно-слоистое;
- трещиноватое;
- сильнотрещиноватое.

а его состояние характеризуется отношением нагрузки на элементы массива к сопротивлению этой нагрузке и подразделяется:

- на весьма устойчивое;
- устойчивое;
- допустимой устойчивости;
- предельное;
- запредельное состояние.

Основная особенность составленной классификации состоит в том, что в классификации горных пород в массиве по трещиноватости по СНиПу

приводятся значения коэффициента структурного ослабления, но данные значения являются частными значениями для типовых зданий и сооружений была составлена рекомендованная классификация состояния массива горных пород применяемая не только для зданий и сооружений, но и для месторождений с неизученным характером процесса сдвижения.

## **5. ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ НАД ГОРНЫМИ РАБОТАМИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ – АНАЛОГОВ ПРОВАЛОВ И КРУПНЫХ ТРЕЩИН**

### **5.1 Основные факторы, определяющие образование провалов и крупных трещин в массиве горных пород**

Актуальность определения местоположения горной выработки, вызвавшей образование на земной поверхности провалов и крупных трещин по данным наблюдений на земной поверхности обусловлена возрастающей частотой техногенных катастроф, спровоцированных интенсивным ростом масштаба добычи полезных ископаемых.

Общепризнано, что один из наиболее значимых видов техногенного воздействия на недра связан с подземной добычей. Разработка месторождений и связанные с ними нарушения первоначального равновесия в напряженном состоянии верхней части земной коры в результате добычи полезного ископаемого, нарушение гидрогеологического режима в связи с откачкой подземных вод нарушают природное равновесное состояние недр. Тем самым, создавая предпосылки для возникновения сильных и в ряде случаев катастрофических природно-техногенных событий, деформаций земной поверхности, повреждение систем и объектов обустройства [5]. При этом все аварийные и катастрофические ситуации, как правило, возникают из-за двух основных причин:

- формирование карстовой полости, вызванной растворением пород кровли, которая может привести к обрушению пород и образованию провала на земной поверхности;
- аварии и катастрофы, обусловленные неправильным ведением горных работ.

С освоением закарстованных территорий тесно связано понятие карстоопасность, которое представляется как определенное сочетание природных и (или) природно-техногенных условий и факторов развития, карстовых и сопутствующих процессов, способное вызвать динамические явления в основаниях инженерных сооружений на поверхности или внутри карстового массива, в результате которых могут возникнуть аварии, катастрофы, экологические бедствия.

С точки зрения оценки опасности карста для различных объектов, выделяются следующие типы карстовых деформаций земной поверхности:

- обрушение налегающей толщи пород над карстовыми пустотами с образованием на земной поверхности, в зависимости от параметров и условий залегания пустот, провалов или локальных зон оседаний с плавными деформациями:
- постепенные длительные оседания (коррозия) земной поверхности в местах выхода растворимых пород на поверхность за счет их растворения, суффозионного выноса.
- комбинированные и промежуточные типы (плавные оседания, осложненные провалами).

На развитие процесса обрушения налегающих пород, обусловленные неправильным ведением горных работ влияют:

- характер строения налегающих пород;
- физико-механические свойства налегающих пород;
- условия залегания;
- применяемые системы разработки;
- интенсивность и концентрация очистных работ;
- соотношение пролета подработки и глубины залегания месторождения.

Практика разработки рудных месторождений показывает, что к обрушению наиболее склонны трещиноватые или слоистые слабые породы, имеющие геологические нарушения [28]. Процессы обрушения протекают интенсивнее при отработке пологопадающих и наклонных залежей, имеющих значительную мощность. При медленном подвигании очистных работ происходит постепенное растрескивание, расслоение и самообрушение подрабатываемых пород. Интенсивная же отработка может быть причиной "мгновенной" посадки в виде сплошных крупных блоков.

Таким образом, во всех случаях опасность образование провалов и крупных трещин связана, прежде всего, с геомеханическими факторами и геомеханическими процессами, происходящими в массиве горных пород.

Поставленная перед диссертационной работой задача обосновать и разработать методику решения обратной геомеханической задачи при образовании над горными работами месторождения – аналогов провалов и крупных трещин, требует, именно, ответа на вопрос – в результате чего образовался провал и что спровоцировало образование данного провала.

Исходя из условий образования провалов, крупных трещин и определяющих геомеханических факторов опасности обрушений, перед разработкой методики решения обратной геомеханической задачи для определения обрушения необходимо изучение иерархически блочной структуры и параметров ее характерных зон определяющих параметры полости повлекшей за собой обрушение и образование крупных трещин;

## **5.2 Иерархически блочная структура и характерные зоны массива горных пород**

В соответствии с основными положениями теории глобальной тектоники плит, литосфера Земли представляет собой относительно жесткую оболочку, «плавающую» на поверхности достаточно вязкой мантии. Эта оболочка разбита

региональными тектоническими нарушениями на ряд крупных литосферных блоков, линейные размеры которых достигают нескольких тысяч километров; эти, так называемые, мегаблоки находятся в постоянном движении относительно друг друга. Каждый литосферный блок, в свою очередь, разбит на множество более мелких структурных блоков системами региональных и локальных тектонических нарушений, по которым также происходят тектонические подвижки. Таким образом, реальный массив горных пород представляет собой сложную иерархически-блочную среду, каждая структурная единица которого находится в постоянном движении относительно окружающих ее структурных единиц. Уже установлено, что тектонические нарушения даже невысокого ранга обладают достаточной подвижностью, которая носит как трендовый направленный характер, так и представлена циклическими полигармоническими колебаниями с различной продолжительностью циклов. В настоящее время достаточно хорошо известно о движениях литосферных плит, происходящих по таким крупным живущим разломам как Сан-Андреас в Калифорнии, Северо-Анатолийский в Турции и др. На остальной же территории Земли массив горных пород в большинстве случаев остается малоисследованным и представляется как среда статическая и незыблемая.

Различные дефекты строения пород приповерхностной части литосферы имеют самые разные размеры - от микроскопических до многих сотен и даже тысяч километров (рис. 3.1)

По размеру дефектов выделяют пять уровней примерно соответствующих уровням неоднородности [61].

IV — Дефекты кристаллической решетки минералов, составляющих породу: вакансии, межузельные атомы, дислокации и т.п. изучаемые в физике твердого тела.

III — Микротрещины, разбивающие отдельные кристаллы и небольшие участки горной породы. Размер их может быть условно ограничен величинами 001 мм - 10 см (по длине).



*Рис. 5.1* **Обнажение закарстованного массива как пример иерархической блочной структуры.**

II – Макротрещины, видимые в обнажениях и изучаемые в ряде отраслей геологии. Условно их линейные размеры ограничиваются интервалом 10 см — 100 м.

I - Разрывы, разбивающие массивы горных пород и связанные обычно с локальными складчатыми структурами. Условно их линейные размеры принимаются в интервале 100 м - 10 км.

0 - Крупные тектонические разрывы, связанные с региональными полями тектонических напряжений и разбивающие целые участки литосферы - вплоть до глубинных разломов.

Анализ неоднородности горных пород в массиве позволяет ввести достаточно строгое определение понятия структуры массива, удобное для инженерных приложений. Под структурой можно понимать совокупность «закономерных» изменений свойств пород в массиве [14]. При этом неоднородность высшего порядка и эффективная характеризуется как свойства материала, из которого построен массив. Массив есть естественная конструкция, созданная природой из этого материала.

Тектонические нарушения, выполняющие роль швов между соседними блоками, всегда имеют определенную толщину (мощность), зависящую, как правило, от их ранга. Она может изменяться от нескольких сантиметров до нескольких метров, а у крупных разломов она может достигать десятков и сотен метров.

При использовании обычных методов исследования, принятых в инженерной геологии и при обычных размерах крупных инженерных сооружений (порядка сотен метров или первых километров) возникает следующая характерная ситуация. Дефекты уровней IV и III, т.е. дефекты кристаллической решетки и микротрещины, выступают в роли неоднородности высшего порядка и вносят свой вклад в формирование свойств пород как материала. Дефекты уровней 0 и I определяют инженерно-геологические условия территории строительства в целом (региональные разрывы) или выступают в роли крупных, относительно немногочисленных элементов структуры массивов горных пород. Дефекты II уровня (макротрещины) занимают промежуточное положение, обуславливая, во-первых, крайне нерегулярный характер изменчивости свойств пород в массиве и, во-вторых, различие между свойствами пород в образце и в массиве. Поэтому проблема учета макротрещиноватости является основной в комплексе задач инженерной геомеханики массивов горных пород.

Структура, прочностные и деформационные свойства массива горных пород в тектонических нарушениях резко отличаются от пород в блоках.

Они, как правило, сильнотрещиноваты, часто перетерты до дресвянопесчано - глинистого состояния, вследствие чего в массиве имеют низкие прочностные и деформационные характеристики, хотя отдельные образцы пород по этим показателям могут немногим отличаться от аналогичных пород в блоках.

Второй важной особенностью иерархически блочного массива горных пород является взаимная подвижность блоков. По своему происхождению ее можно разделить на два вида: естественные движения, обусловленные природными процессами, протекающими в массиве горных пород: техногенные, вызванные процессами недропользования.

Истоки природной подвижности, именуемой современными геодинамическими движениями, пока до конца неясны. Причиной ее может служить большое число факторов эндогенного и экзогенного характера. Для практических целей решения проблемы снижения риска техногенных катастроф важен факт ее существования, возможность изучения параметров проявления и влияния на безопасность объектов недропользования.

С точки зрения активизации процессов образования провалов и крупных трещин, наибольший интерес представляют границы блоков, т.е. тектонические нарушения различного порядка, представленные сильнотрещиноватыми дезинтегрированными породами, имеющими повышенные фильтрационные характеристики, особенно в окраинных частях.

Примером влияния тектонических нарушений на активизацию процессов образования провалов и крупных трещин, может служить земляная воронка в штате Луизиана в США и образование провала, произошедшего на калийном месторождении недалеко от железнодорожной станции г. Березняки Пермского края.

Земляная воронка, возникшая 03 октября 2012 года в штате Луизиана, США, продолжает углубляться, становясь нешуточной угрозой для предприятий и жилых территорий, находящихся рядом с ней. Проседание грунта появилось в лесном массиве, успев достигнуть площади в 1 395 м<sup>2</sup>. Воронка поглотила участок

дороги, используемой лесными службами во время расчистки леса. По результатам ультразвукового исследования,



*Рис. 5.2 Земляная воронка в штате Луизиана в США.*

причиной проседания почвы мог стать резервуар или пещера с соленой водой, которая находится в недрах земли как раз в штате Луизиана. Но почему воронка появилась именно сейчас, конкретных ответов ученые не имеют. На поверхности дыры было обнаружено вещество неизвестного происхождения, напоминающее смесь почвы и песка в странной пропорции.

В администрации города Березники подвели итоги наблюдения за ситуацией на БКПРУ-1 ОАО «Уралкалий» за период с 14 по 20 сентября текущего года.

По данным ОАО «Уралкалия», на 20 сентября абсолютная отметка уровня воды в воронке провала на промышленной площадке БКПРУ-1

составила +110,38 метров. Уровень сейсмической активности в районе провала низкий. В засыпанной воронке зарегистрировано одно сейсмическое событие, связанное с подвижками засыпанной в воронку песчано-гравийной смеси с эпицентром в юго-западной части воронки.



***Рис. 5.3 Провал на калийном месторождении ОАО «Уралкалий».***

Как сообщили ГКУ «Гражданская защита», граница провала сместилась на 50 метров восточнее и по состоянию на 20 сентября размеры воронки составляют 130 на 106 метров. Причины образования воронки

На основании выше приведенных примеров, а также опыта многолетних исследований на горно-обогатительных комбинатах и в пределах городской инфраструктуры иерархически блочное строение, а в частности, активные тектонические нарушения являются одним из факторов, определяющими

устойчивость оснований сооружений и подверженность развитию процессов провалов и крупных трещин.

Зачастую очень сложно определить по какой причине произошло обрушение или образование крупных трещин, либо это произошло из-за формирования карстовой полости, которая может привести к обрушению пород и образованию провала на земной поверхности, либо аварии и катастрофы, обусловленные ведением горных работ. В этом случае возникает потребность в составлении методики решения обратной геомеханической задачи при образовании над горными работами месторождения – аналогов провалов и крупных трещин.

### **5.3 Разработка методики решения обратной геомеханической задачи при образовании над горными работами месторождений – аналогов провалов и крупных трещин**

Одним из последних фактических примеров является образование провала, произошедшего на калийном месторождении недалеко от железнодорожной станции г. Березняки Пермского края.

Для определения причин образования провала на земной поверхности на месторождении был произведен ряд вычислений с использованием решения обратной геомеханической задачи, согласно которой параметры образовавшейся полости или выработанного пространства, повлекшей за собой обрушение земной поверхности, определяются по наблюдаемым сдвигениям и деформациям земной поверхности на основании использования установленных закономерностей развития геомеханических процессов.

Определим причину образования провала земной поверхности на месторождении. Для достижения указанной цели был произведен ряд вычислений с использованием решения обратной геомеханической задачи, т.е. параметры

образовавшейся полости или выработанного пространства, повлекшей за собой обрушение земной поверхности, определяют по наблюдаемым сдвигениям и деформациям земной поверхности на основании использования установленных закономерностей развития геомеханических процессов.



***Рис. 5.4 Провал на калийном месторождении недалеко от железнодорожной станции г. Березники Пермского края.***

Двадцать пятого ноября 2010 года при проходе грузового состава под железнодорожным полотном станционного пути «РЖД» образовалась воронка, увеличивающаяся в размерах. Место аварии находится южнее железнодорожной станции г. Березники и севернее провала, образовавшегося 28 июля 2007 г. (рис.5.4).

По состоянию на 16.12.2010 г. размеры воронки составили в субширотном направлении 69 метров, в субмеридиональном направлении 38 метров.

Для анализа и установления причин возникновения провала были собраны инструментальные наблюдения за оседаниями земной поверхности, которые были выполнены по системе из 48 наблюдательных пунктов, включающие профильные линии, состоящие как из грунтовых, так и стенных реперов. Периодичность наблюдений определяется выявленными скоростями оседаний и прогнозируемыми деформациями земной поверхности. В связи с образованием воронки на ж/д путях были заложены дополнительные репера в этом районе с учащёнными наблюдениями. Так, зная местоположение характерных точек мульды сдвижения, можно определить параметры полости или выработки (повлекшей за собой обрушение земной поверхности): местоположение, размеры, глубину залегания и т.д. Для определения местоположения полости в толще пород, вызвавшие образование провала на земной поверхности, поэтапно выполняем ряд действий:

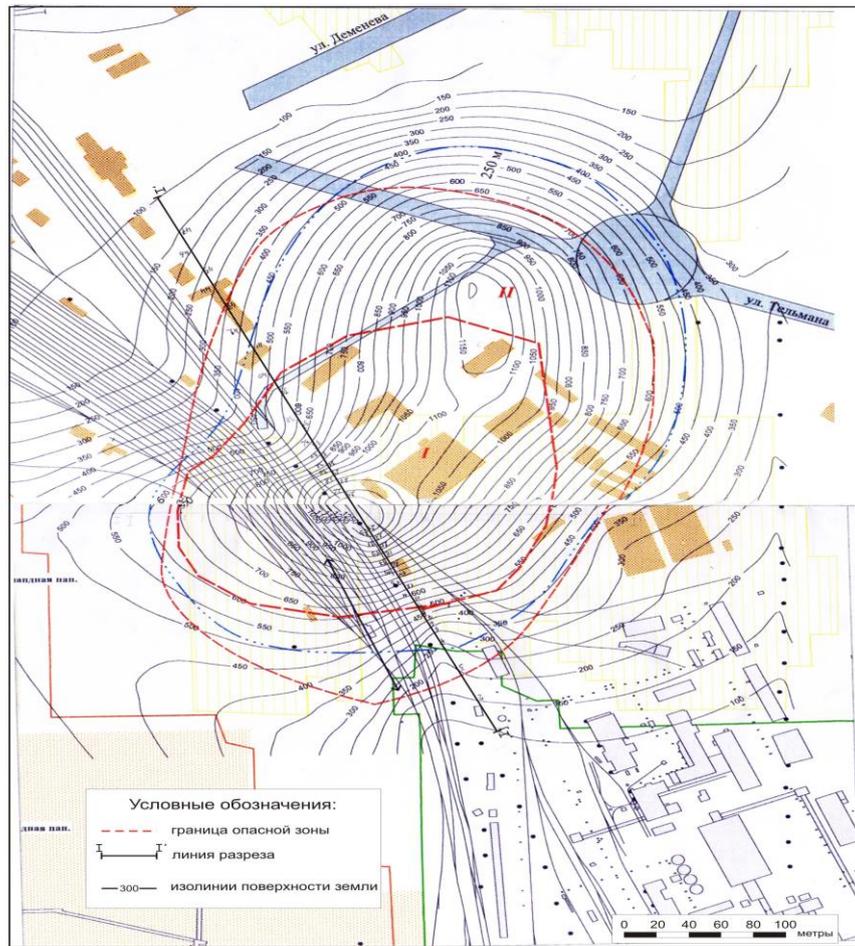
По результатам образовавшегося провала и составленного плана оседания земной поверхности (Рис. 5.5), определяем наклоны и кривизну.

Наклон в любой точке представляет собой тангенс угла наклона касательной к кривой оседания, который рассматривается как первая производная от функции оседания по горизонтальной координате.

Первую производную от оседаний, которая является, по существу наклоном  $i$  вычисляем по следующей формуле:

$$i = \frac{\eta_1 - \eta_2}{l} \quad (5.1)$$

Кривизна - вертикальная деформация земной поверхности, определяемая как отношение разности наклонов двух соседних интервалов мульды к полусумме длин этих интервалов. Первая производная от наклона или вторая производная от оседания, которая является, кривизной  $k$ , вычисляется по следующей формуле:



**Рис. 5.5 План оседания земной поверхности рудника БКПРУ-1.**

$$k = \frac{2 \times (i_{1-2} - i_{2-3})}{l_{1-2} + l_{2-3}} \quad (5.2)$$

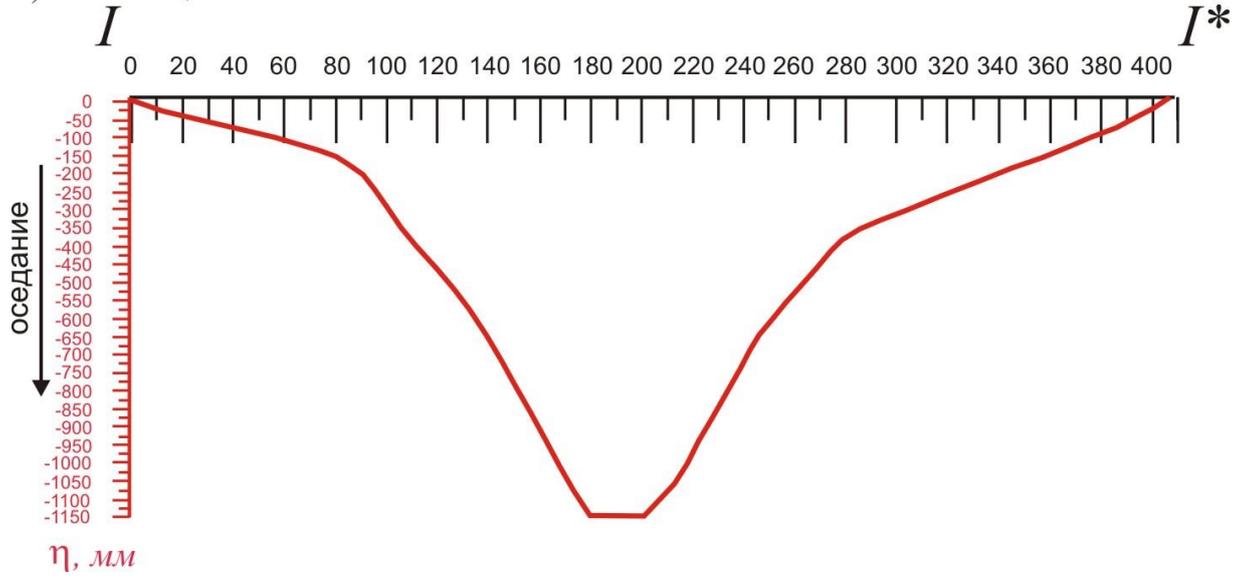
Где:  $\eta$ - оседание [м];

$l$ - длина интервала [м.];

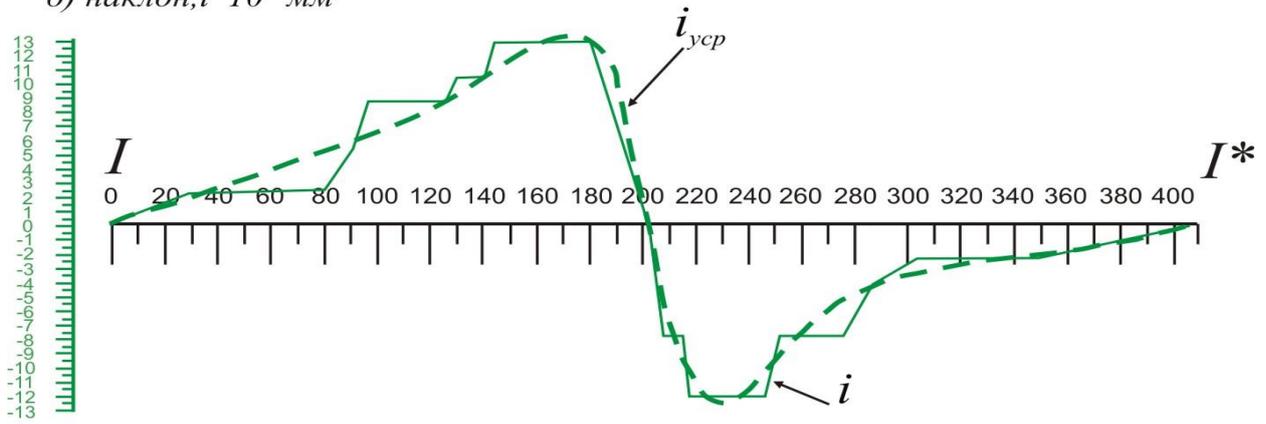
$i$ - наклон [ $10^{-3}$ ];  $k$  –кривизна [1/м.].

На Рис. 5.6 (а) показано распределение оседаний земной поверхности по исходным данным. Максимальное оседание в образовавшейся мульде сдвижения наблюдается над центром мульды, и составляет 11,5 м. После обработки данных, строим графики наклона Рис. 5.6 (б) и кривизны Рис. 5.6 (в) с усредняющими кривыми.

а) оседание, мм

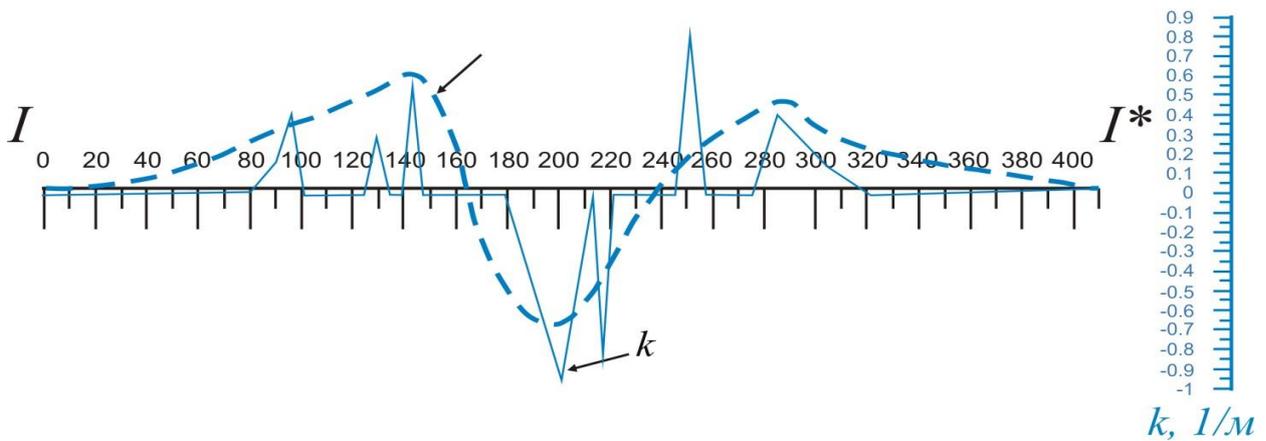


б) наклон,  $i \cdot 10^{-3}$  мм

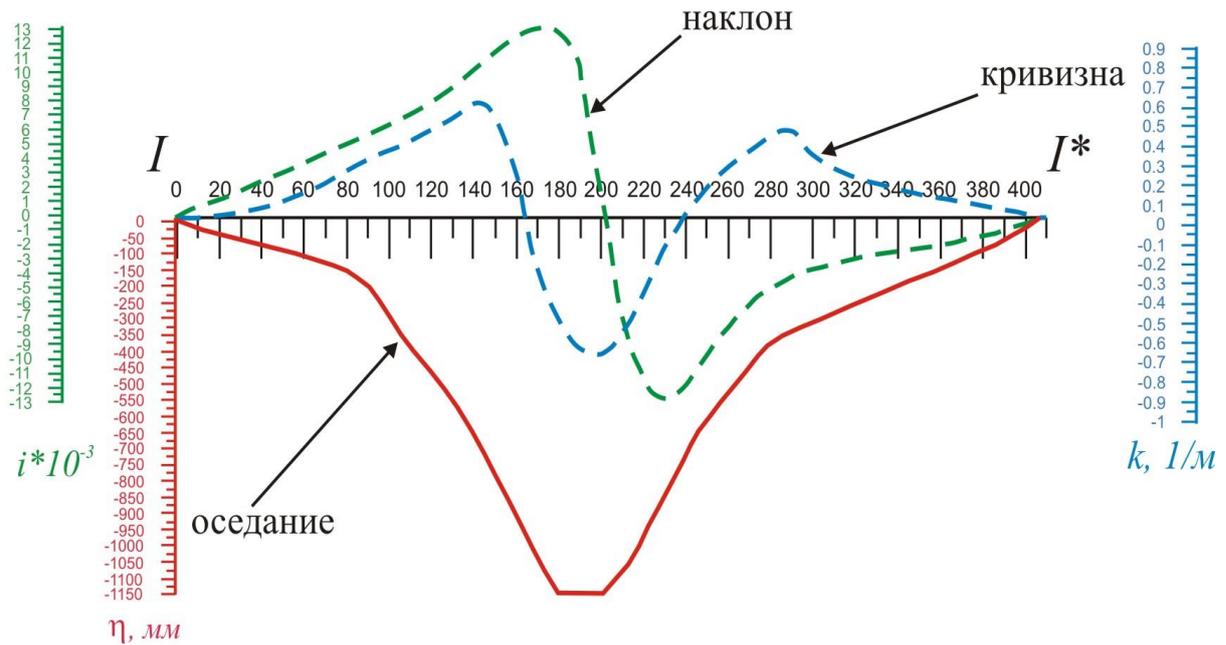


$i \cdot 10^{-3}$

в) кривизна  $k$ ,  $1/\text{м}$



з) общая схема



**Рис. 5.6** Графики расчетных значений (а) – оседания, (б) – наклона, (в) – кривизны, (г) общая схема.

Где: I-I\* – линия разреза;

$\eta$  – оседание;

$i_{\text{уср}}$  - усредненная кривая наклона  $i$ ;

$k_{\text{уср}}$  - усредненная кривая кривизны  $k$ .

Пересечения линий, проведенных от характерных точек мульды сдвижения под соответствующими углами влияния, которые определяются при решении прямой задачи геомеханики, указывают на положение границы выработанного пространства.

Получив графики оседания  $\eta$ , наклона  $i$  и кривизны  $k$  строим соответствующие углы влияния (Рис. 5.6). Исходя из «Указаний по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей», граничный угол  $\delta_0$  будет равен  $55^0$  [73].

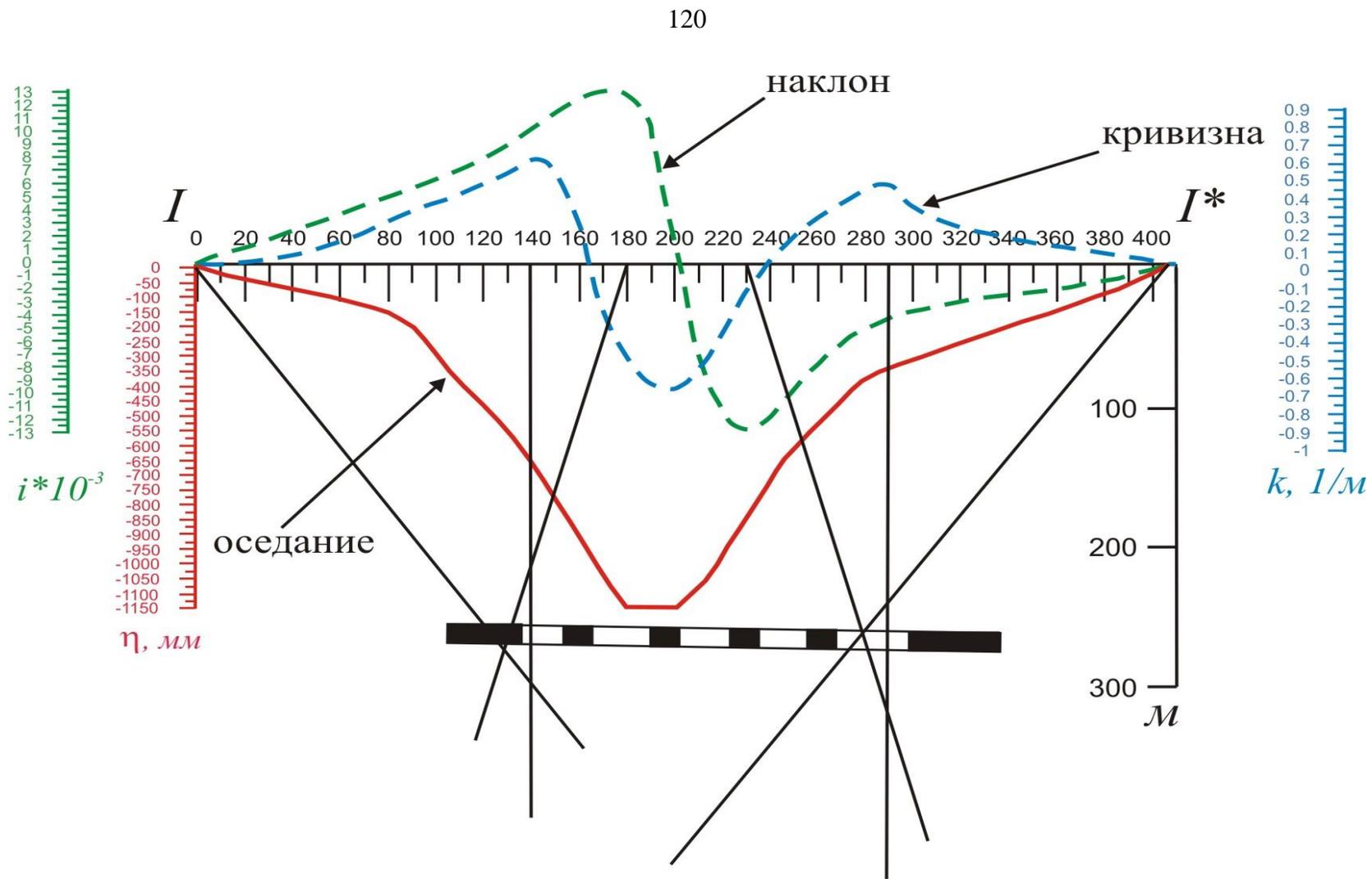
В настоящее время методы определения параметров выработанного пространства при подземной добыче основываются преимущественно на взаимосвязи местоположения максимальных наклонов в мульде сдвижения с границей выработанного пространства.

Под углом максимального влияния наклонов на положение выработанного пространства  $\sigma_i$  понимают внешний относительно выработанного пространства угол наклона линии, соединяющей интервал на участке земной поверхности с максимальным наклоном и границу выработанного пространства. Ранее уже предпринимались попытки определения местоположения на земной поверхности точки с  $i_m$  в аналитико-экспериментальном методе расчета сдвижений и деформаций земной поверхности [22, 23, 24, 13]. В результате проведенных исследований были установлены зависимости угла  $\sigma_i$  от двух влияющих факторов – угла падения пласта и коэффициента подработанности земной поверхности. Исходя из того, что данное месторождение залегает горизонтально, угол максимального влияния наклонов определяем следующим выражением:

$$\delta_i = 90^0 + 15^0 n \quad (5.3)$$

где:  $n$  – коэффициент подработанности земной поверхности;

Под коэффициентом подработанности земной поверхности понимают отношение фактического размера выработанного пространства к минимальному размеру, при котором наступает полная подработка земной поверхности. Как правило, значение коэффициента подработанности земной поверхности меньше или равно единице. Для большей безопасности



**Рис. 5.7** Определение местоположения полости (выработки) посредством решения обратной геомеханической задачи.

коэффициент подработанности принимаем  $n=1$ . Подставив все значения в выражение (4.8) получаем, что угол максимального влияния наклона на положение выработанного пространства равен  $\sigma_i=105^0$ .

Таким образом, путем решения обратной геомеханической задачи, графически устанавливаем, что глубина залегания полости (выработки), повлекшей за собой образование воронки, составляет 260 метра. Из вышесказанного можно сделать вывод, что наиболее вероятной причиной образования на земной поверхности воронки явилось ведение работ в пласте сильвинита. Данный способ определения местоположения полости в толще пород, вызвавшей образования провала на земной поверхности, можно использовать как методическое пособие по установлению причин возникновения обрушений на земной поверхности.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1. Зная местоположение характерных точек мульды сдвижения и можно определить параметры полости или выработки (повлекшей за собой обрушение земной поверхности): местоположение, размеры, глубину залегания и т.д
2. Получила развитие методика решения обратной геомеханической задачи по определению местоположение горной выработки, вызвавшей образование на земной поверхности провалов и крупных трещин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-исследовательской и квалификационной работой, приведено решение актуальной задачи оценки механических характеристик массивов осадочных пород на месторождениях с неизученным характером процесса сдвижения, имеющей большое научное и практическое значение для повышения безопасности и эффективности горных работ и эксплуатации подрабатываемых объектов.

Основные выводы диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Установлена зависимость угла сдвижения от основных влияющих факторов, являющегося интегральным показателем состояния, строения и механических характеристик массивов осадочных пород, которая представлена в виде:

$$\delta = 50^{\circ} + 1^{\circ} \left( 3,5 \sqrt{f_{cp.}} + 3 \sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{\gamma H}} + 2 \sqrt{\frac{D}{H}} + 0,7 \sqrt{\frac{H}{m}} \right)$$

2. Показано, что наиболее полно отражают особенности месторождения на начальной стадии его освоения отношение нагрузки на массив горных пород к сопротивлению этой нагрузке и отношение прочности пород на растяжение или на сдвиг к прочности пород на сжатие;

3. Установлено, что показатель неоднородности массива горных пород связан с коэффициентом структурного ослабления и находится в следующей зависимости от отношения прочности пород на растяжение или на сдвиг к прочности пород на сжатие:

$$П_n = \lambda \times \sqrt[a]{\left(\frac{\sigma_{рас.Л}}{\sigma_{сж.Л}}\right)^{a-1}} \quad (1)$$

$$P_n = d \times \sqrt[a]{\left(\frac{\tau}{\sigma_{сж..Л}}\right)^{a-1}} \quad (2)$$

где:  $a = 2$  и  $\lambda = \sigma_{рас}/\sigma_{сж}$  в выражении (1);

$a = 3$  и  $d = \tau/\sigma_{сж}$  в выражении (2).

4. Составлена классификация критериев подобия месторождений -аналогов, впервые обеспечивающая необходимой информацией при проектировании месторождений с неизученным характером процесса сдвижения;
5. Разработана методика учета возможности образования над горными работами провалов и крупных трещин при выборе месторождений аналогов;
6. Показано, что наиболее надежно выбирается месторождение – аналог при использовании четырех критериев, в число которых входят, прежде всего, свойства, строение, состояние массива горных пород, а также горно-геологические условия разработки месторождения;
7. Выдвинута и экспериментально подтверждена гипотеза о наличии подобия в структуре горных пород на микро- и макроуровнях.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Авершин С.Г. Некоторые вопросы теории сдвижения горных пород. «Горный журнал», № 11, 1948
2. Авершин С.Г. Сдвижение горных пород при подземных разработках. Углетехиздат, 1947
3. Авершин С.Г., Кузнецов М.А. Расчет элементов сдвижения поверхности в условиях разработок пологопадающих пластов. ВНИМИ, выпуск XV. Углетехиздат, 1948
4. Айнбиндер И.И. Развитие интенсивных методов добычи руд на больших глубинах. М., ИПКОН АН СССР, 1990г., - С. 233.
5. Акимов А.Г., Земисев В.Н., Кацнельсов Н.Н. и др. Сдвижение горных пород при подземной разработке угольных и сланцевых месторождений. – М.: Недра, 1970. С. 224
6. Алексеев А.Д., Питаленко Е.И., Маевский В.С., Ермаков В.Н. Деформационные процессы в горном массиве при закрытии угольных шахт // Физико-технические проблемы горного производства - Донецк: ДонФТИ, 1998. — С. 5-9.
7. Бахурин И.М. Сдвижение горных пород под влиянием горных разработок. Гостоптехиздат, 1946
8. Белаенко Ф.А. Напряжения вокруг круглого ствола шахты при упруго-пластичных породах. Изв. АН СССР, ОТН, 1950. № 6. 914-925 с.
9. Блашкевич И.А. Результаты наблюдения за сдвижением поверхности в Карагандинском каменноугольном бассейне. ВНИМИ, выпуск IVIII, Углетехиздат, 1950
10. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. Учебник для вузов. - М.: Недра, 1982. — 270 с.
11. Булычев Н.С., Фотиева Н.Н., Стрельцов Е.В. Проектирование и расчет капитальных выработок. М.: Недра. 1986. 288 с.

12. Введение в механику скальных пород: Пер. с англ./Под ред. Х. Бока. - М.: Мир, 1983. — 276 с., ил.
13. Викторов С.Д., М.А. Иофис, С.А. Гончаров. Сдвигение и разрушение горных пород. – М.: Наука, 2005. – 38 с.
14. Геологическая структура. Опыт формализованного определения и описания. Статья 1. Определение понятия геологической структуры [Текст] / Ю. А. Косыгин и др.// Геология и геофизика. - 1966. -№11.
15. Гертнер П.Ф. Подработка сооружений на шахтах Донбасса. ВНИМИ, выпуск XVIII. Углетехиздат, 1949
16. Головачев Д.Д.- Измерение давления горных пород на рудничную крепь с помощью струнного метода. Тр. совещ. по управлению горным давлением. М.-Л., 1938. 103-112 с.
17. Горная энциклопедия (в 5-ти томах) /Гл. ред. Е.А. Козловский. – М.: Сов. энциклопедия. 1984 – 1991
18. Динник А.Н. О давлении горных пород и расчет крепи круглой шахты. Инж. работника, 1925. № 7 1-12 с.
19. Динник А.Н., Моргаевский А. Б. Савин Г.Н. Распределение напряжений вокруг подземных горных выработок. Тр. Совещ. по управлению горным давлением. Л.-М., 1938. 7-55 с.
20. Звонарев Н.К.. А.с. 1183676 СССР. Способ определения механических свойств горного массива – Оpubл. В Б.И., 1985, № 38.
21. Земисев В.Н. Расчет деформаций горного массива. – М.: Недра, 1973. – С.144
22. Иофис М.А., А.Н. Медянецв Определение оптимальных размеров предохранительных целиков угля в Донбассе // Разработка месторождений полезных ископаемых /ТЕХНИКА КИЕВ – 1975. – С. 40-43
23. Иофис М.А., Черняев В.И. Определение вертикальных сдвижений и деформаций земной поверхности при выемке наклонных и крутопадающих пластов // Горный журнал. – 1979. – № 6. – 20-22 с.

24. Иофис М.А., Шмелев А.И. Инженерная геомеханика при подземных разработках. – М.: Недра, 1985. – 248 с.
25. Казаковский Д.А. Сдвигение земной поверхности под влиянием горных разработок. Углетехиздат, 1953 – 157 с.
26. Казаковский Д.А., Глейзер М.И. Правила охраны сооружений от вредного влияния горных разработок в условиях угольных и сланцевых месторождений СССР. Труды ВНИМИ, выпуск XX, 1949.
27. Канлыбаева Ж.М., К.Б. Бакитов, К.Ш. Джанбуршина. Физико – механические свойства горных пород и их влияние на процесс сдвижения массива. – Наука, АЛМА – АТА, 1972, 23-45 с.
28. Каплунов Д.Р., Калмыков В.Н., Рыльникова М.В. Комбинированная технология. М.: Изд.дом «Руда и металлы», 2003.
29. Каплунов Д.Р., Помельников И.И., Левин В.И. и др. Комплексное освоение месторождений: проектирование и технология подземной разработки. – М.: ИПКОН РАН, 1998. 383 с.
30. Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеева А.Б. Прочность и деформируемость горных пород - М.: Недра, 1979. —269 с.
31. Ким Д.Н. Исследование структурного ослабления трещиноватых пород моделирование прочностных свойств в лабораторных условиях. Тр. ИГД УФ АН СССР. Свердловск, 1963. – Вып. 5. – 97-106 с.
32. Козеев А.А., В.Ю. Изаксон, Н.К. Звонарев. Термо- и геомеханика алмазных месторождений. – Новосибирск, Наука. 1995, 29-38 с.
33. Колбеков С.П., Павлов А.Н. К вопросу расчетов деформаций земной поверхности // Труды по вопросам горного давления, сдвижения горных пород и методики маркшейдерских работ/ ВНИМИ. – 1963. – Сб. 50. – С. 114-130
34. Коротков М.В. О дополнениях и уточнения Правил охраны сооружений от вредного влияния горных разработок в Донбассе.
35. Кошелев К.В., Петренко Ю.А., Новиков А.О. Охрана и ремонт горных выработок /Под ред. К.В.Кошелева – М.: Недра, 1990 – 218 с.

36. Кузнецов Г.Н. Информация об опыте постановки наблюдений за поведением горных пород в выработках. ЦНИМБ, выпуск 1, 1934
37. Кузнецов Г.Н. Информация об опыте постановки наблюдений за поведением горных пород в выработках. ЦНИМБ, выпуск 5, 1937
38. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. М.: Углетехиздат, 1947. 180 с.
39. Кузнецов Г.Н. Экспериментальные методы исследования вопросов горного давления. Тр. совещ. по управлению горным давлением. М. 1948. 90-150 с.
40. Кузнецов Г.Н., Слободов М.А. Определение методов разгрузки напряжений, действующих в междукammerных целиках. Тр. ВНИМИ. 1950, № 22 151-174 с.
41. Кузнецов С.В. Напряженное состояние горных пород и давление на междукammerные целики. ФТПРПИ - 1997 - № 5.
42. Кузьмин Е.В., Узбекова А.Р. Рейтинговые классификации массивов скальных пород: предпосылки создания, развитие и область применения // ГИАБ, №4, 2004. — 201—202 с.
43. Кузьмин Е.В., Узбекова А.Р. Самообрушение руды при подземной добыче: Учебное пособие. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2006. — 283 с.: ил.
44. Кульбах О.Л., Коротков М.В. Первые итоги систематических наблюдений сдвижения дневной поверхности под влиянием каменноугольных разработок в Донбассе. ЦНИМБ, №1, 1934
45. Лабасс А. Давление горных пород в угольных шахтах. Вопросы теории горного давления. М., 1961. 59-164 с.
46. Леонтовский П.М. Литература об обрушении и оседании пород в рудниках и о влиянии их на дневную поверхность. Екатеринослав, 1912.
47. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. М.-Л.: Гостехтеориздат, 1950. 300 с.
48. Литвинский Г.Г.. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов.- Алчевск, 2008. 13-15 с.

49. Михлин С.Г. О напряжениях в породе над угольным пластом. Изв. АН СССР. Отд-ние техн. наук. 1942. № 7-8. 13-28 с.
50. Мохначев М.П., Присташ В.В. Динамическая прочность горных пород. - М.: Наука, 1982.— 141с.
51. Макаров А.Б. Практическая геомеханика. Пособие для горных инженеров. – М.: Горная книга, 2006.
52. Макаров А.Б., Борщ - Компониец В.И. Горное давление при отработке мощных пологих рудных залежей. – М.: Недра, 1986.
53. Покровский М.П. О некоторых результатах анализа и оценки классификаций месторождений полезных ископаемых // Геология и поиски месторождений редких и цветных металлов (Труды СГИ, вып.131). Свердловск: издание института, 1976. 118-133 с.
54. Покровский М.П. О требованиях к геологическим классификациям // Геология и поиски месторождений редких и цветных металлов (Труды СГИ, вып. 81). Свердловск: Издание института, 1971. 97-107 с.
55. Поляк З.И. Сдвигение горных пород в Подмосковном угольном бассейне. Углетехиздат, 1947
56. Попов В.Н. , В.А. Букринский. Геодезия и маркшейдерия.- М.: МГГУ, 2004, 208-210 с.
57. Попов В.Н. , О.Б. Сильченко, М.С. Парамонова, Об изменении физико – механических свойств горных пород с глубиной залегания // ГИАБ - №5/2011. 108-117 с.
58. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях, С.-Петербург, ВНИМИ, 1998
59. Проскуряков Н.М. Управление состоянием массива горных пород: Учеб. для вузов. М.: Недра, 1991. – 386 с.
60. Протодяконов М.М. Давление горных пород на рудничную крепь. – Екатеринослав, тип. Губерн. Земства, 1907. 102 с.

61. Рац М. В. Неоднородность горных пород и их физических свойств - М.: Наука, 1968. - 108 с.
62. Рац М. В. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород - М.: Недра, 1970. - 164 с.
63. Ржевский В.В., Г.Я. Новик Основы физики горных пород. Учебник для вузов 4 – е издание. – М.: Недра, 1984. – 359 с.
64. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. — М: Недра, 1978. — 390 с.
65. Родин И.В. К вопросу о влиянии выработок на напряженное состояние горного массива. Изв. АН СССР, ОТН, 1950. № 12. 1763-1783 с.
66. Романович И.Ф. Месторождения неметаллических полезных ископаемых. Учебное пособие для вузов. М.: Недра, 1986. 367 с.
67. Ростовцев Д.С. Управление кровлей при разработке пологопадающих пластов каменного угля. Харьков – Киев, 1935. 378с
68. Руппейнейт К.В. Деформируемость массива в расчетах устойчивости горных пород. – М.: Недра, 1991. – 104 с.
69. Савин Г.Н. Распределение напряжений около отверстий. Киев: Наукова думка, 1968. 887 с.
70. Слесарев В.Д. Механика горных пород. М: Углетехиздат, 1948. 303 с.
71. Словарь по гидрогеологии и инженерной геологии. — М.: Гостоптехиздат. Составитель: А. А. Маккавеев, редактор О. К. Ланге. 1961.
72. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.-Л: Изд-во АН СССР, 1942. 207 с.
73. Трубецкой К.Н., Малышев Ю.Н., Иофис М.А. Геомеханическое обеспечение разработки месторождений полезных ископаемых: Докл. На IX Международном конгрессе по маркшейдерскому делу, Прага, 1994.
74. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. – Л.: Недра, 1989. – С. 488

75. Указания по защите рудника от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях верхнекамского месторождения калийных солей (технологический регламент). Санкт – Петербург 2008г. 41с.
76. Фисенко Г.Л. некоторые вопросы сдвижения горных пород при разработке глубоких горизонтов угольных шахт // Исследование проявлений горного давления на глубоких горизонтах шахт / ВНИМИ. – 1971. – Сб.88. – С. 337-346
77. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов угольных карьеров. М.: Углетехиздат, 1956. 230 с.
78. Фисенко ГЛ. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М.: Недра, 1965. 387 с.
79. Цимбаревич П.М. Механика горных пород М.; Углетехиздат,. 1948. 184 с.
80. Шевяков Л.Д. О расчете прочных размеров и деформаций опорных целиков. Изв. АН СССР. Отд-ние техн. наук. 1941.№ 7-8. 3-13 с.; №9. 43-58 с.
81. Шерман Д.И. Об одном методе решения некоторых задач теории упругости для двухсвязных областей. ДАН СССР. Нов. сер. 1947. Т. 40, №8. 701-704 с.
82. Штетбахер А. Пороха и взрывчатые вещества / Пер с нем. М.: ОНТИ, 1936.620 с.
83. Beniaowski Z.T., 1989. Engineering Rock Mass Classification. Wiley, New York. 251 p.
84. Fenner R Untersuchungen zur Erkenntnis des Gebirgsdruckes. Gluckauf. 1938. Bd. 74. N 32. S. 681-695; N33. 705-715 S.
85. G. Dumont , Des affaissements du sol, produits par L'exploitation houilles, Liege, 1871
86. Goldreich, Die Theorie dcr Bodensenkungen in Kohlengebiclcn. 1913.
87. Gonot, Not sur les degradations survenues aux maisons situees le long du Quat Fragnee etc, Liege. 1863 отдельная брошюра.
88. Hoek E, Brown E.T. Practical estimates of rock mass strength. Int J. Rock Mech Min Sci 1997; 34(8): 1165-86 pp.

89. Jacubec J., Laubscher D.H., 2000. The MRMR Rock Mass Rating Classification System in Mining Practice. Brisbane.
90. Jlcinsky. Über senkungen und Brüche der Tagesoberfläche Infolge des Abbaus von Kohlenflatze, Zelischr. Berg. u. Hutt-Wes., 1876. S.456.
91. Laubscher D.H., 1990. A Geomechanics Classification System for the Rating of Rock mass in Mine Design, J Sth Afr Inst Min Met. 257-73 p.
92. Laubscher D.H., Jacubec J. The MRMR Rock Mass Classification for jointed rock masses. Foundations for Design. 2000.
93. Note sur les mouvements de terrain, provoques par l'exploitation des mines, 1885