

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Разумов Евгений Анатольевич

**Разработка атласа вариативности сценариев формирования
напряжённо-деформированного состояния массива
в окрестности подземных горных выработок**

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

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
д. т. н., профессор РАН
Еременко В. А.

Москва
2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Устойчивость подготовительных выработок в зоне совместного влияния очистных и подготовительных выработок зависит от напряжённо-деформированного состояния массива горных пород и угольных целиков, которое формируется при влиянии комплекса природных и техногенных факторов.

Отсутствует общая база данных предиктивной оценки напряженно-деформированного состояния в окрестности подготовительных выработок для выбора способов и средств поддержания подземных выработок при разработке угольных месторождений в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях, которая обеспечит решение локальных задач горного производства.

Проведение исследований для создания общей базы предиктивной оценки напряженно-деформированного состояния в окрестности подготовительных выработок, вероятно встречающих на своём протяжении осложняющие факторы, является актуальной научно-практической задачей.

Целью работы является разработка атласа вариативности сценариев формирования напряженно-деформированного состояния массива в окрестности подготовительных выработок для различных вариантов горно-геологических и горнотехнических условий освоения угольных месторождений подземным способом.

Идея работы заключается в том, что на основе атласа при использовании выявленных по результатам численного моделирования и шахтных экспериментов закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния массива (НДС) в окрестности подготовительных выработок определяются возможные сценарии его состояния при подземной разработке угольных месторождений, которые систематизируются для различных вариантов горно-геологических и горнотехнических условий.

Задачи исследования:

1) Провести анализ горно-геологических и горнотехнических условий проведения и поддержания подготовительных выработок, положительных ($t+$) и отрицательных ($t-$) температур горного массива при разработке угольных месторождений подземным способом.

2) Определить закономерности формирования НДС массива на основе численного моделирования и количественные критерии оценки вариантов возможных сценариев формирования его состояния.

3) Разработать методику и провести натурные исследования НДС массива горных пород в окрестности подготовительных выработок и угольных целиков для определения критериев и параметров устойчивости массива, закономерностей формирования зон структурного ослабления вмещающих пород и калибровки численных моделей.

4) Систематизировать различные варианты горно-геологических и горнотехнических условий проведения и поддержания подготовительных выработок для условий разработки угольных месторождений подземным способом.

5) Разработать атлас вариативности сценариев формирования НДС массива в окрестности подготовительных выработок для различных вариантов горно-геологических и горнотехнических условий освоения угольных месторождений подземным способом.

Методы исследований включают определение прочности горных пород в шахтных и лабораторных условиях, эндоскопические и геофизические шахтные исследования строения и напряжённого состояния углепородной толщи, измерения деформаций пород и элементов крепи в окрестности выработок на подземных наблюдательных станциях, математическое моделирование численным методом конечных элементов напряжённо-деформированного состояния углепородного массива в окрестности горных выработок.

Научные положения, выносимые на защиту:

1) Параметры крепи подготовительных выработок в различных условиях подземной разработки угольных месторождений выбираются с учётом определения НДС массива из атласа вариативности возможных сценариев состояния на основе численного расчёта коэффициента остаточной прочности пород и натурных исследований местоположения зон его критических значений.

2) На основе численного моделирования и калибровки моделей рассчитывается коэффициент остаточной прочности пород, который определяет их устойчивость. При $K_{оп} \leq 0,5$ происходит разрушение пород, при $0,5 < K_{оп} \leq 0,7$ формируется зона предразрушения (трещины, блоки, возможны вывалы), при $0,7 < K_{оп} \leq 1$ уголь или порода находятся в упругом состоянии без нарушения сплошности.

3) В окрестности подготовительной выработки в условиях положительных ($t+$) и отрицательных ($t-$) температур высота зоны предразрушения в кровле выработки при $t+$ и $t-$ увеличивается прямо пропорционально глубине разработки и обратно пропорционально увеличению мощности угольного пласта в пределах, а коэффициент концентрации вертикальных напряжений при $t+$ в 1,2-1,4 раза больше по сравнению с аналогичными участками вблизи выработки при $t-$.

Научная новизна заключается:

- в методике количественного прогнозирования напряжённо-деформированного состояния неоднородного массива горных пород, отличающейся алгоритмами настройки входных параметров численной модели по результатам натурных измерений смещений контура выработки и автоматической корректировкой смещений всех вершин конечных элементов;

- в синтезе методов эндоскопической съёмки породных слоёв, георадиолокационных измерений временных интервалов между импульсами, отражёнными от границ раздела сред с разными электрофизическими характеристиками, оценки показателя напряжённости массива горных пород, определении прочностных свойства горных пород, мониторинге смещений пород с помощью реперных станций для формирования информационной базы данных, обеспечивающей настройку входных параметров математической модели геомеханических процессов и выбор крепи выработок;

- в разработке атласа вариативности сценариев формирования НДС массива в окрестности подготовительных выработок для различных вариантов горно-геологических и горнотехнических условий освоения угольных месторождений подземным способом.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается:

- корректным применением комплекса методов научных исследований, включающих численные, лабораторные и шахтные эксперименты;
- представительным объёмом лабораторных, аналитических и шахтных исследований в широком диапазоне горно-геологических условий шахт умеренного климата и в криолитозоне;
- удовлетворительной сходимостью расчётных и измеренных напряжений и деформаций в окрестности подготовительных выработок вне и в зоне влияния зависящих пород кровли подготовительной выработки от очистного выработанного пространства;
- результатами практического применения атласа вариативности при проведении и поддержании подземных выработок в сложных условиях шахт умеренного климата и в криолитозоне.

Научное значение работы состоит в теоретическом обосновании и внедрении в производство атласа вариативности при разработке угольных пластов в сложных условиях, в том числе в зоне вечной мерзлоты.

Практическая значимость результатов исследований состоит в разработке и реализации атласа вариативности сценариев формирования НДС массива в окрестности подготовительных выработок для различных вариантов горно-геологических и горнотехнических условий освоения угольных месторождений подземным способом при совокупном влиянии природных и техногенных факторов в условиях шахт умеренного климата и криолитозоне.

Отличие от ранее выполненных работ заключается в разработке атласа вариативности, расширении диапазона применения разработанных универсальных способов и средств обеспечения устойчивости подземных выработок в сложных природных и техногенных условиях умеренного климата и криолитозоны.

Связь темы диссертации с научно-техническими программами.

Работа выполнена в соответствии с планами научных исследований Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачёва» и Сибирского филиала ВНИМИ по проектам «Определение состояния горных выработок, закрепленных анкерной крепью с использованием методов георадиолокации с исследованием и выдачей рекомендаций по сохранению в эксплуатационном состоянии участков дренажного штрека и конвейерного штрека 5210, охраняемых целиками от влияния очистных работ лав 52-12, 52-3, 5209 для ПЕ «Шахта имени В. Д. Ялевского»; «Рекомендации по определению параметров усиления анкерной крепи сопряжения вентиляционного штрека 66-09 с лавой 66-09 в условиях шахты «Талдинская-Западная-1», Документация на «Техническое перевооружение опасного производственного объекта АО «Ургалуголь» в части выработок с учётом напряженно-деформированного состояния углепородного массива в условиях пласта В-26», Проект ОАО ХК «Якутуголь» Шахта «Джебарики-Хая».

Реализация работы. Разработка атласа вариативности проводилась на базах 12 предприятий Кузбасса, АО «Ургалуголь», ОАО ХК «Якутуголь» Шахта «Джебарики-Хая», актуальность и достоверность атласа подтверждается геотехническими службами предприятий.

Личный вклад автора заключается в:

- обобщении и анализе отечественного и зарубежного опыта современных способов и средств обеспечения устойчивости подземных выработок в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях умеренного климата и криолитозоны;

- создании базы данных о количественных и качественных параметрах и характеристиках массива горных пород, достаточной для настройки входных параметров математической модели геомеханических процессов и выбора крепи выработок;

- адаптации методики количественного прогнозирования напряжённо-деформированного состояния неоднородного массива горных пород к сложным природным и техногенным условиям;

- организации и проведении шахтных и лабораторных экспериментов прочностных и деформационных характеристик массива горных пород в зонах умеренного климата и криолитозоне;

- калибровке каждого из вариантов атласа по шахтным и лабораторным экспериментам;

- разработке и реализации атласа вариативности, способов, средств и рекомендаций по обеспечению устойчивости подготовительных выработок в зонах умеренного климата и криолитозоне.

Апробация результатов. Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: I, X, XII Международных научно-практических конференциях «Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов», проводимых в рамках специализированных выставок технологий горных разработок «Уголь России и майнинг» (г. Новокузнецк, СибГИУ, 2010, 2018 и 2021 гг.); VI Международной научно-практической конференции «Перспективы инновационного развития угольных регионов России» (г. Кемерово, КузГТУ, 2018 г.); VI всероссийской, 59-й научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая» (г. Кемерово, КузГТУ, 2014 г.); IX и X Международной научно-практической школы молодых учёных и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (г. Москва, ИПКОН РАН, 2012 и 2013 г.).

Публикации. Результаты научных исследований по теме диссертации опубликованы в 12 работах, из них 8 в изданиях, рекомендуемых ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю д. т. н. В. А. Еременко, развитие идей которого, постоянное внимание и помощь способствовали успешному выполнению работы; сотрудникам Сибирского филиала ВНИМИ за помощь при проведении исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность, цель и задачи исследований.

В первой главе рассмотрены причины отклонения от запланированных темпов подвигания подготовительных забоев. Ими являются природные и техногенные факторы или их сочетание: геологическое нарушение, зона повышенной трещиноватости пород, зона куполения пород, зона повышенного горного давления, изменение физико-механических свойств пород в криолитозоне под влиянием тепловых режимов машин, при котором происходят теплообменные процессы между мёрзлыми породами и шахтной атмосферой.

Существенный вклад в создание и реализацию способов и средств геомеханического обоснования эксплуатационной устойчивости выработок на угольных шахтах внесли следующие известные отечественные и зарубежные учёные: М. А. Иофис, И. А. Турчанинов, Г. Н. Кузнецов, Г. Л. Фисенко, И. В. Баклашов, В. В. Ржевский, Б. А. Картозия, К. В. Руппенейт, А. В. Докукин, Е. И. Шемякин, П. И. Мельников, К. Ф. Войтковский, Ю. Д. Дядькин, В. Ю. Изаксон, Е. А. Ельчанинов, Д. П. Сенук, Ю. В. Громов, А. С. Курилко, В. Б. Артемьев, В. В. Дырдин, П. В. Егоров, В. А. Ерёменко, Ж. С. Ержанов, Ю. З. Заславский, Ф. П. Ивченко, С. И. Калинин, Г. И. Коршунов, А. Е. Майоров, К. Ополони, И. М. Петухов, А. А. Ренёв, М. А. Розенбаум, В. Н. Скуба, Я. Фармер, Г. Л. Фисенко, В. А. Хямяляйнен, Х. В. Хуве, А. Н. Шабаров, Е. И. Шемякин, В. М. Шик, А. П. Широков, М. Юнкер, О. Якоби, Д. В. Яковлев, Y. Zhang и др.

По результатам анализа современных достижений горной науки в части создания способов и средств обеспечения устойчивости подземных выработок при разработке угольных пластов в сложных установлено, что перспективными являются следующие направления исследований:

- стандартизация и расширение области применения типов и конструкций крепи в подготовительных забоях для исключения аварийных ситуаций при изменчивости горно-геологических условий в пределах выемочного столба;
- разработка методики расчёта параметров крепи с учётом влияния геотектонического поля напряжений;
- разработка рекомендаций при ведении горных работ в зонах влияния геологических нарушений;
- разработка рекомендаций по повышению безопасности горных работ при проведении и поддержании подготовительных выработок;
- адаптация традиционных способов и средств крепления горных выработок к условиям растепления пород при буровзрывных работах.

Таким образом, перспективным направлением исследований является создание общей базы предиктивной оценки напряжённо-деформированного состояния в окрестности подготовительных выработок для выбора способов и средств поддержания подземных выработок при разработке угольных месторождений в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях, которая обеспечит решение локальных задач горного производства.

Во второй главе изложены методика количественного прогнозирования напряжённо-деформированного состояния массива и натурных исследований процессов деформирования горных пород в окрестности подземных выработок и угольных целиков, программа вычислительного эксперимента, показан пример калибровки модели в соответствии с полученными результатами шахтных экспериментов.

Сущность методики количественного прогнозирования геомеханических процессов в неоднородном массиве горных пород, предназначенной для оценки совместного влияния горно-геологических и горнотехнических условий на устойчивость подземных горных выработок, состоит в формировании цифровой модели геомассива и топологии горных выработок, численном моделировании геомеханических процессов, создании базы данных результатов шахтных измерений, оценке соответствия расчётных и измеренных геомеханических параметров, корректировке входных параметров расчётной модели по результатам натурных измерений, прогнозе вариантов технологических решений по обеспечению устойчивости горных выработок.

Использование в разрабатываемой методике информационной базы угольной шахты позволило осуществить постановку задачи для численного моделирования геомеханических процессов в окрестности одиночной или группы взаимовлияющих выработок с учётом влияния комплекса природных и техногенных факторов.

Варианты геометрических моделей горного массива основаны на горно-геологических и горнотехнических условиях 12 шахт Кузбасса, 1 шахты Хабаровского края, 1 шахты Якутии.

Программа численного эксперимента включает формирование моделей массива горных пород с изменением в каждой модели одного из горно-геологических или горнотехнических параметров. Всего было исследовано 84 варианта моделей (табл. 1), из них 6 использованы для настройки программы.

На каждом этапе исследований проводилось определение и сравнение для всех вариантов моделей следующих геомеханических параметров и характеристик:

- коэффициент концентрации вертикальных напряжений как отношение напряжений в окрестности горных выработок к напряжениям в нетронутом массиве горных пород K_{σ} ;

- коэффициент остаточной прочности пород от влияния горных работ $K_{оп}$.

Расчёт коэффициента концентрации вертикальных напряжений производится по формуле

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{в}}{\gamma H}, \quad (1)$$

где $\sigma_{в}$ – вертикальные напряжения, вычисленные методом конечных элементов, МПа;

γ – объёмный вес пород, Н/м³;

H – глубина разработки, м.

Табл. 1. Номера и характеристика вариантов моделей при вычислительном эксперименте исследования влияния усложняющих факторов на напряжённо-деформированное состояние массива горных пород

| Характеристика вариантов моделей массива горных пород | Номера вариантов при вычислительном эксперименте | | | |
|--|--|--|----------------------|--|
| | шахты в зоне умеренного климата | | шахты в криолитозоне | |
| | одиночная выработка | влияние очистного выработанного пространства | одиночная выработка | влияние очистного выработанного пространства |
| Глубина 500 м; мощность пласта 2 м; угол падения -10 град; целик 32,5 м; структурное ослабление 0,5; высота выработки 3,3 м; ширина выработки 4,5 м; присечка почвы и кровли поровну по 0,65 м | 9 базовый | 10 базовый | 43 базовый | 44 базовый |
| Дизъюнктив: угол наклона 90°; ширина 10 м; расположен в целике | 11 | 12 | 45 | 46 |
| Дизъюнктив: угол наклона 45°; ширина 10 м; расположен в целике | 13 | 14 | 47 | 48 |
| Глубина 200 м, ширина целика 20 м | 3 | 4 | 77 | 78 |
| Глубина 1000 м, ширина целика 37,5 м | 15 | 16 | 49 | 50 |
| Мощность пласта 1,2 м | 17 | 18 | 51 | 52 |
| Мощность пласта 2,2 м, ширина целика 35 м | 19 | 20 | 53 | 54 |
| Мощность пласта 3,5 м, ширина целика 42,5 м | 21 | 22 | 55 | 56 |
| Коэффициент крепости угля $f=0,75$, упрочнение целика клеевым составом на 5 м от штрека до $f=1,125$ | 23 | 24 | 57 | 58 |
| Коэффициент структурного ослабления пород $k_{ст.осл.}=0,4$ | 25 | 26 | 59 | 60 |
| Коэффициент структурного ослабления пород $k_{ст.осл.}=0,7$ | 27 | 28 | 61 | 62 |
| Коэффициент структурного ослабления пород $k_{ст.осл.}=0,9$ | 29 | 30 | 63 | 64 |
| Посредине пласта прослоек породы $m=0,5$ м, коэффициент крепости $f=2$ | 31 | 32 | 65 | 66 |
| Посредине пласта прослоек породы $m=0,5$ м, коэффициент крепости $f=3$ | 41 | 42 | 75 | 76 |
| Посредине пласта прослоек породы $m=0,5$ м, коэффициент крепости $f=4$ | 33 | 34 | 67 | 68 |
| На высоте 4 м от кровли пласта слой аргиллита, $m=1$ м, $f=1,2$ | 35 | 36 | 69 | 70 |
| На высоте 8 м от кровли пласта слой аргиллита, $m=1$ м, $f=1,2$ | 37 | 38 | 71 | 72 |
| На высоте 12 м от кровли пласта слой аргиллита, $m=1$ м, $f=1,2$ | 39 | 40 | 73 | 74 |
| Ширина зоны оттаивания 0,5 м | | | 79 | 80 |
| Ширина зоны оттаивания 1 м | | | 81 | 82 |
| Ширина зоны оттаивания 1,5 м | | | 83 | 84 |

Коэффициент остаточной прочности пород вычисляется по формуле

$$K_{ОП} = \frac{\tau_{пасп}}{\tau_{расч}}, \quad (2)$$

где $\tau_{пасп}$ – касательные напряжения, вычисленные по паспорту прочности пород, МПа;

$\tau_{расч}$ – касательные напряжения, вычисленные методом конечных элементов для реальной горнотехнической ситуации, МПа.

По результатам шахтных исследований, представленным в главе 3, установлено, что при коэффициенте $K_{ОП} \leq 0,5$ происходит разрушение пород и угля в виде кусков с высыпанием в выработку, наблюдается интенсивный отжим. При $0,5 < K_{ОП} \leq 0,7$ формируются крупные трещины, формируются блоки, возможны вывалы, далее по тексту эта область рассматривается как зона предразрушения. При $0,7 \leq K_{ОП} < 1$ – уголь или порода находятся в блочном состоянии, нарушены системой трещин. При $K_{ОП} \geq 1,0$ уголь или порода находятся в упругом состоянии без нарушения сплошности.

Все варианты модели были откалиброваны по результатам натуральных и лабораторных экспериментов. Пример распределения изолиний коэффициента остаточной прочности пород до и после калибровки представлен на рис. 1.

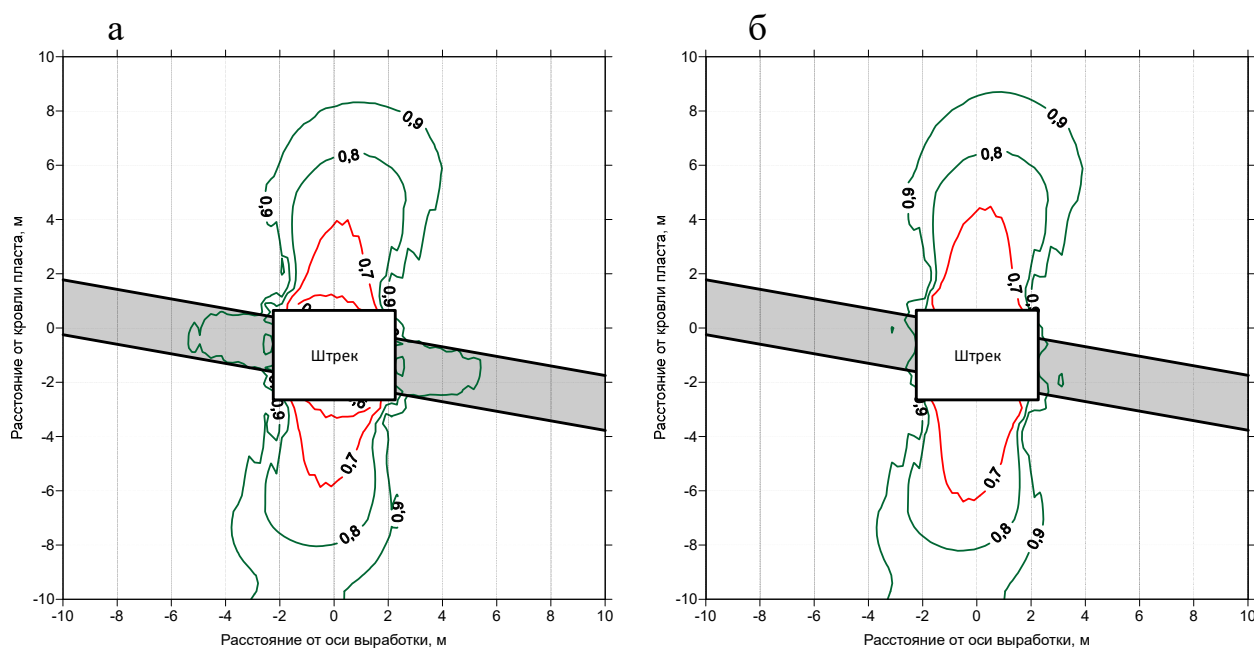


Рис. 1. Результат калибровки по натуральным измерениям зон остаточной прочности, вариант 9: а – до калибровки; б – после калибровки

В третьей главе приведены результаты шахтных и лабораторных исследований влияния природных и техногенных факторов на устойчивость подземных горных выработок, прочностные и деформационные характеристики массива горных пород для формирования информационной базы данных, необходимой при реализации методики количественного прогнозирования напряжённо-деформированного состояния неоднородного массива горных пород на шахтах в зонах умеренного климата и криолитозоне.

Применяемые в математических моделях прочностные и деформационные свойства пород, особенно при переходе их в упруго-пластическое и запредельное состояние, отличаются от фактических параметров. В этой связи актуальными являются исследования, направленные на решение горной геомеханики, в которых инструментальные исследования должны быть использованы для калибровки расчётных методов.

В настоящей работе предлагается применение интегрированных параметров горных пород, отражающих характер функционирования напряжённо-деформированного состояния массива горных пород под влиянием комплекса факторов: природных аномалий, зон повышенного горного давления, техногенных процессов, изменчивость параметров геомассива и др.

В этой связи для реализации алгоритма количественного прогнозирования геомеханических процессов в неоднородном массиве горных пород (рис. 1) проведены с участием автора настоящей работы следующие натурные исследования, результаты которых использованы для настройки входных параметров математических моделей:

- визуальное обследование состояния выработок при маршрутной съёмке по пикетам;
- эндоскопическое обследование породных слоёв в скважинах с помощью видеоэндоскопа Wöhler VIS (рис. 2);
- георадиолокационные измерения временных интервалов между отражёнными от контактов породных слоёв импульсами, ОКО-2 (рис. 3);
- отбор кернов из кровель выработок и последующее определение физико-механических свойств отобранных пород (рис. 4);
- наблюдение за смещением реперов.

Указанные натурные исследования геомеханических процессов в неоднородном массиве горных пород выполнены с участием автора на шахтах Кузбасса, Ургала, Якутии. Основные результаты натурных исследований в виде зависимостей и закономерностей представлены в следующей главе.

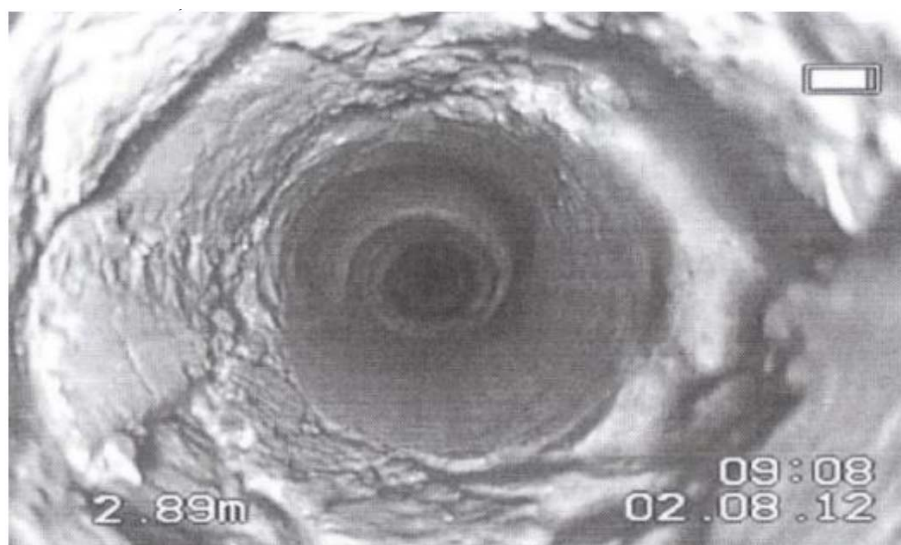


Рис. 2.
Фотография в
штреке стенки
скважины на
глубине 2,9 м

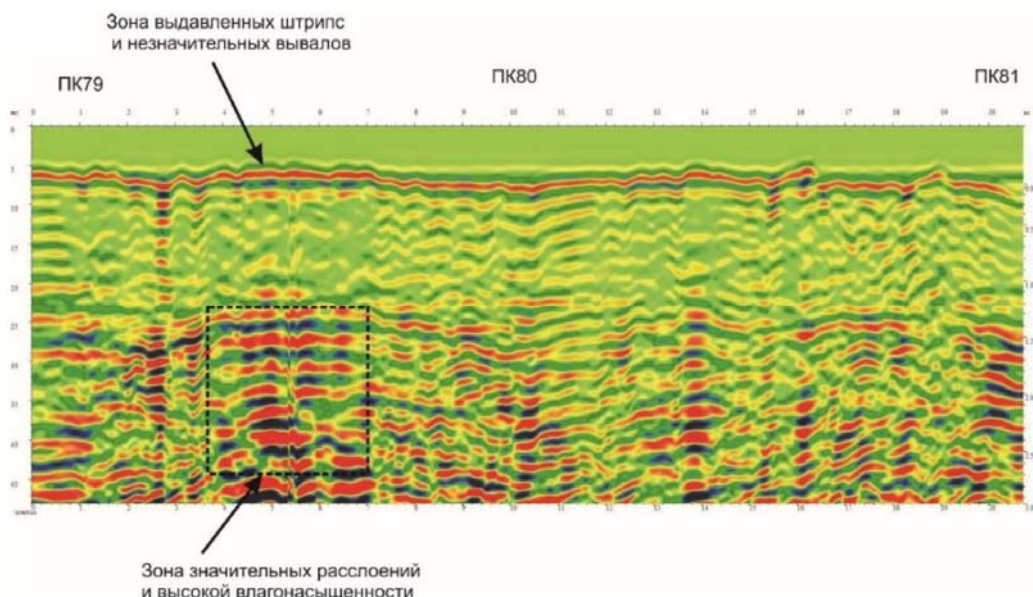


Рис. 3.
Радарограмма
бока штрека на
расстоянии
150 м до лавы



Рис. 4.
Керны пород
кровли штрека

В четвёртой главе разработан атлас вариативности, на основе которого при использовании выявленных по результатам численного моделирования и шахтных экспериментов закономерностей формирования напряжённо-деформированного состояния массива (НДС) в окрестности подготовительных выработок определяются возможные сценарии его состояния при подземной разработке угольных месторождений, которые систематизируются для различных вариантов горно-геологических и горнотехнических условий.

Проведён вычислительный эксперимент с использованием методики количественного прогнозирования напряжённо-деформированного состояния неоднородного массива горных пород при совместном влиянии осложняющих природных и техногенных факторов на устойчивость подземных горных выработок. Выявлены закономерности и зависимости влияния отдельных и группы факторов на геомеханические параметры массива горных пород в окрестности системы подземных горных выработок.

Исследованы влияния глубины разработки, мощности пласта, дизъюнктивов, прочности угля при сжатии, структурного ослабления вмещающих пород, наличия слабого прослойка в пласте и кровле выработки,

ширины зоны оттаивания (рис. 1). По каждому из вариантов атласа проведена калибровка в соответствии с натурными и лабораторными экспериментами и наблюдениями.

Отдельные характерные рисунки изолиний из атласа вариативности, диаграммы распределения коэффициента концентрации вертикальных напряжений и коэффициента остаточной прочности представлены на рис. 5-15.

Изучение влияния глубины разработки

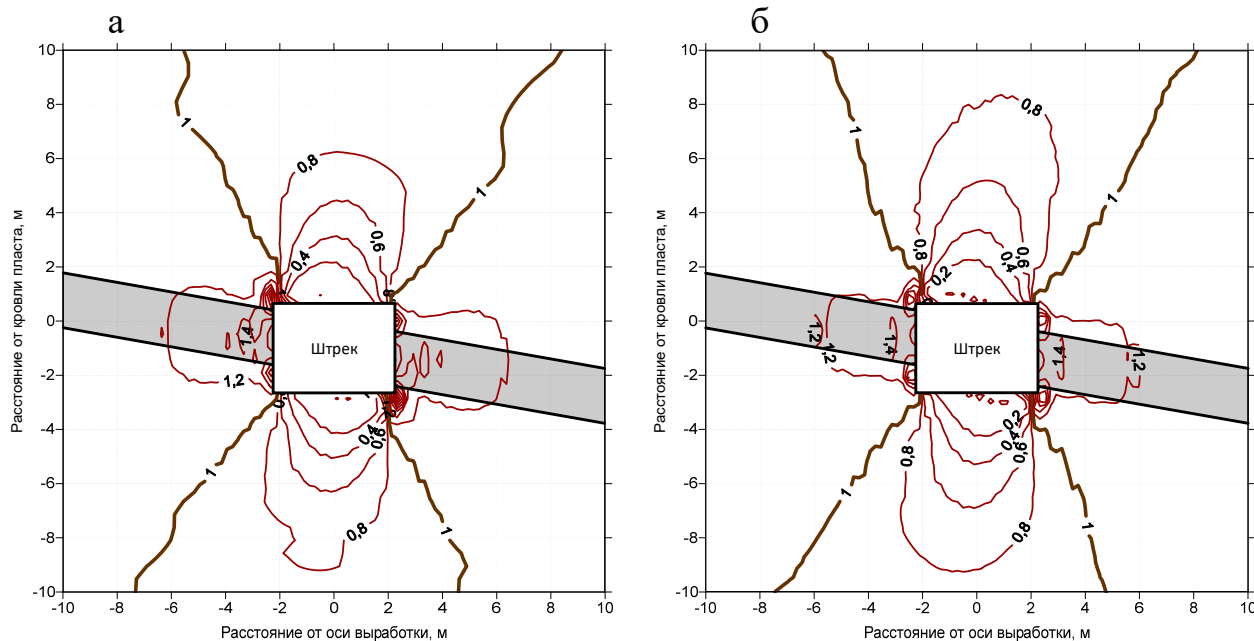


Рис. 5. Изолинии распределения коэффициентов концентрации вертикальных напряжений в окрестности одиночной выработки при расположении её на глубине: а – 200 м (вариант 3); б – 1000 м (вариант 15)

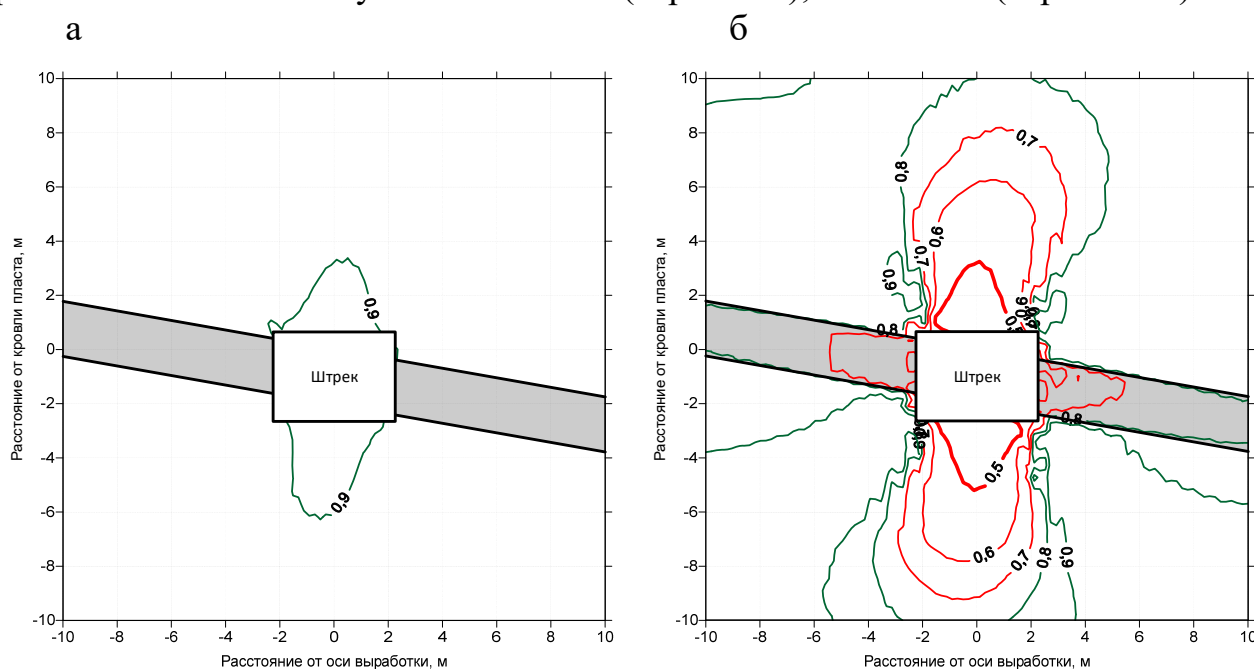


Рис. 6. Изолинии распределения коэффициента остаточной прочности пород в окрестности одиночной выработки при расположении её на глубине: а – 200 м (вариант 3); б – 1000 м (вариант 15)

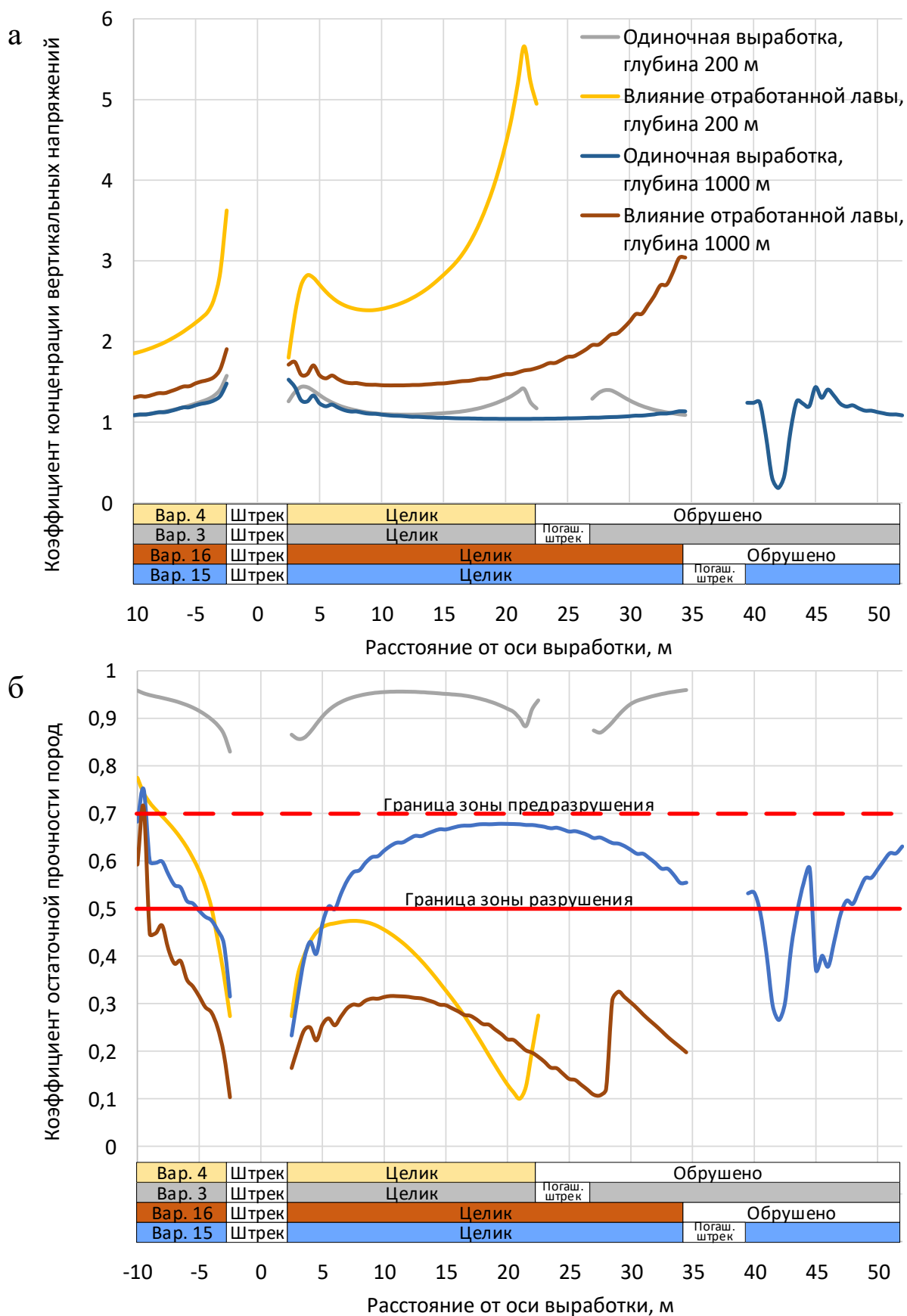


Рис. 7. Графики измерения параметров НДС в зоне влияния подготовительных выработок, очистного выработанного пространства и угольного целика при расположении их на глубине 200 м, 1000 м для шахт умеренного климата (варианты 3, 4, 15, 16): а – коэффициент концентрации вертикальных напряжений; б – коэффициент остаточной прочности пород

По результатам изучения графиков на рис. 5-8 установлено, что в зоне умеренного климата при увеличении глубины разработки эпюры распределения коэффициентов концентрации вертикальных напряжений подобны, однако отчётливо выявляется обратно пропорциональная зависимость коэффициента концентрации вертикальных напряжений при увеличении глубины разработки и прямо пропорциональная зависимость от ширины угольного целика. Значения коэффициентов остаточной прочности пород указывает на предразрушение целиков и вывалы в боках штрека.

При моделировании зоны оттаивания в исходных данных по периметру выработки уменьшался коэффициент крепости пород. Представлены выработки в криолитозоне с контуром оттаивания 2 м.

Высота зоны предразрушения в кровле подготовительной выработки при положительных и отрицательных температурах горных пород прямо пропорциональна глубине разработки.

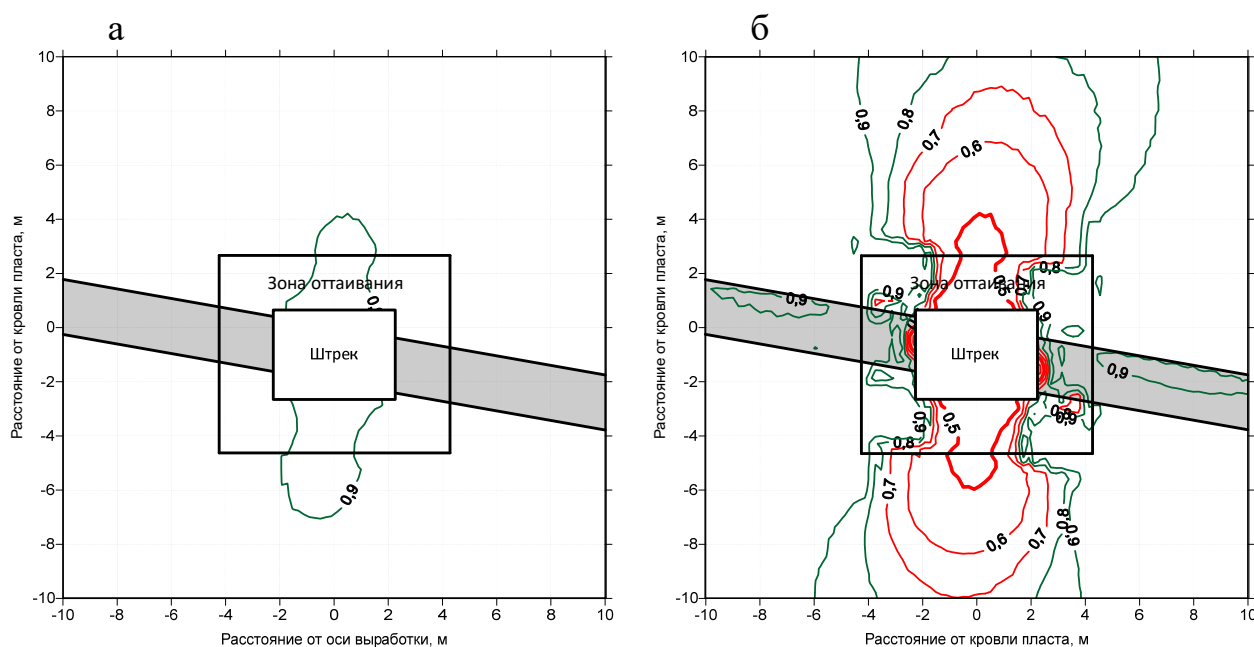


Рис. 8. Изолинии распределения коэффициента остаточной прочности пород в окрестности выработок в криолитозоне: а – одиночная выработка, глубина разработки 200 м (вариант 77); б – одиночная выработка, глубина разработки 1000 м (вариант 49)

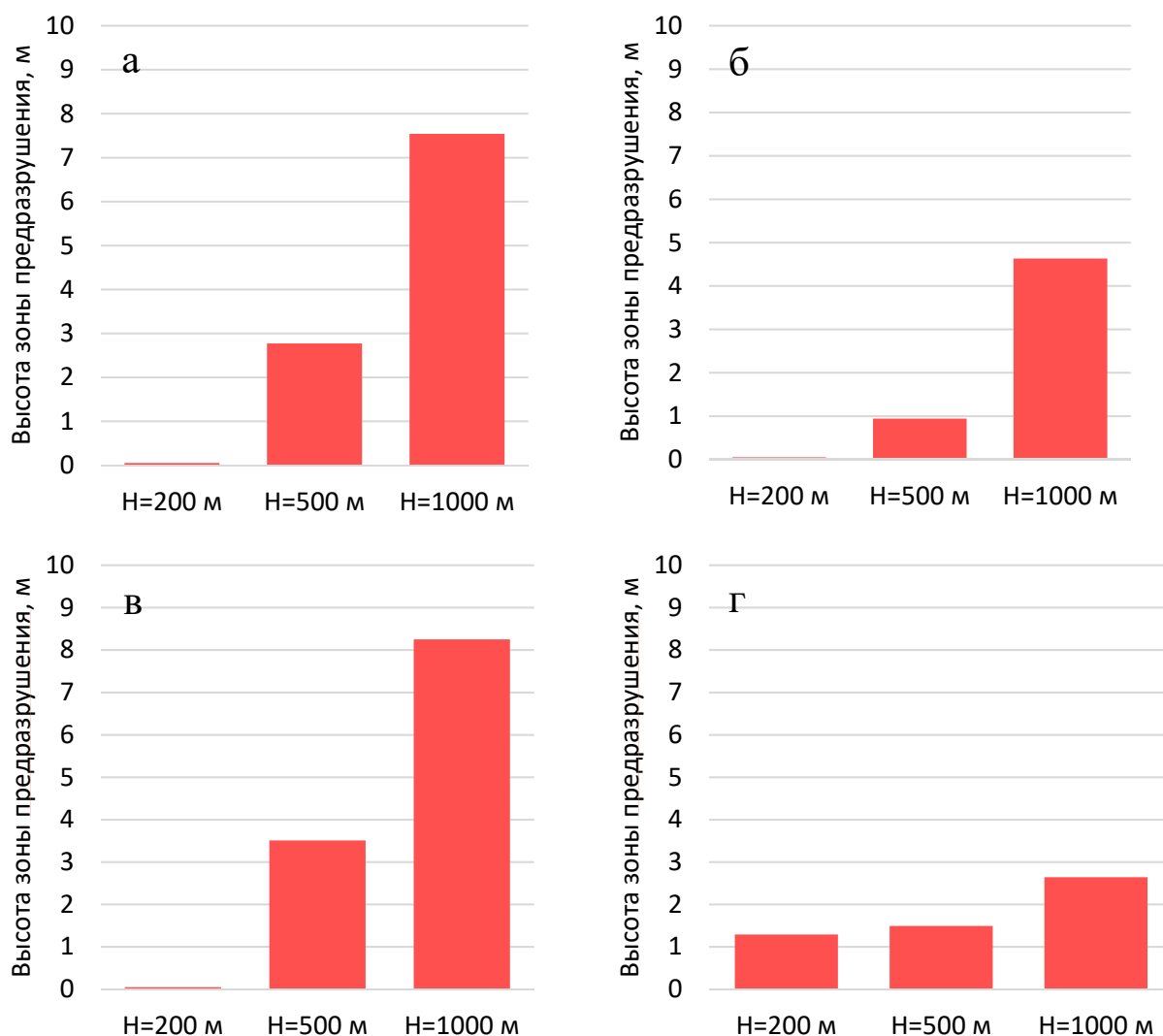


Рис. 9. Гистограммы высот зон предразрушения в кровле подготовительной выработки при различных глубинах расположения выработки: а – зона умеренного климата, одиночная выработка (варианты 3, 9, 15); б – зона умеренного климата, охраняемая целиком выработка (варианты 4, 6, 16); в – криолитозона, одиночная выработка (варианты 77, 43, 49), г – криолитозона, охраняемая целиком выработка (варианты 78, 44, 50)

При моделировании коэффициента концентрации вертикальных напряжений установлено, что его величина для одиночных выработок распределяется почти одинаково относительно их контура (рис. 5, 9). Максимальное значение коэффициента концентрации вертикальных напряжений (опорное горное давление) расположен на расстоянии 0,5-1 метр и от бока выработки.

Зона сжимающий напряжений в окрестности выработок под влиянием повышенного горного давления от ранее отработанного выемочного столба и нагруженного целика смыкается в кровле и почве выработки, растягивающие напряжения переходят не только в пласт, но и во вмещающие породы.

Коэффициент концентрации вертикальных напряжений при положительных температурах в 1,2-1,4 раза больше по сравнению с аналогичными участками вблизи выработки при отрицательных температурах.

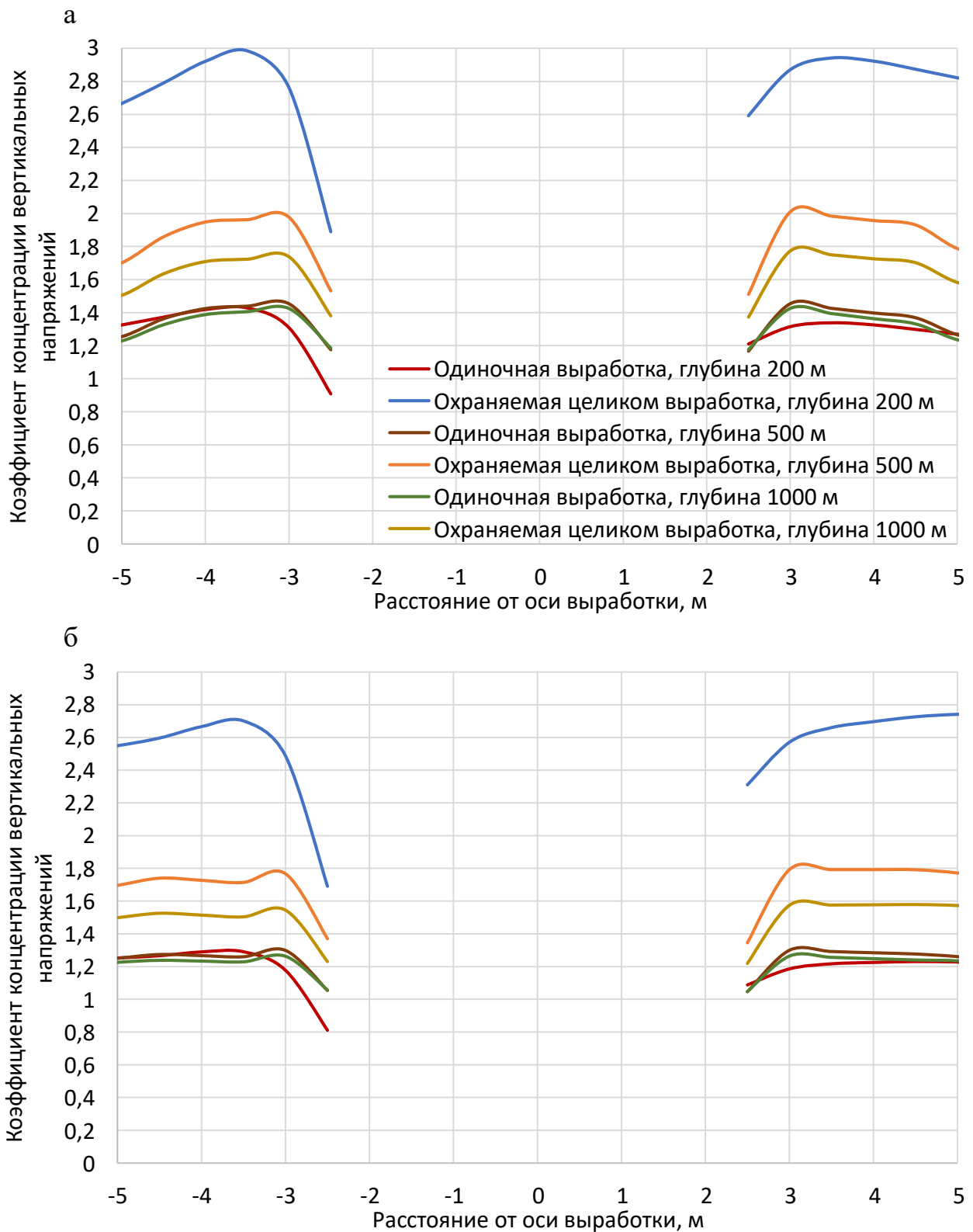


Рис. 10. Графики распределения коэффициента концентрации вертикальных напряжений в боках выработки при расположении её на разных глубинах: а – зона умеренного климата (варианты 3, 4, 9 базовый, 10 базовый, 15, 16); б – криолитозона (варианты 77, 78, 43 базовый, 44 базовый, 49, 50)

Изучение влияния мощности пласта

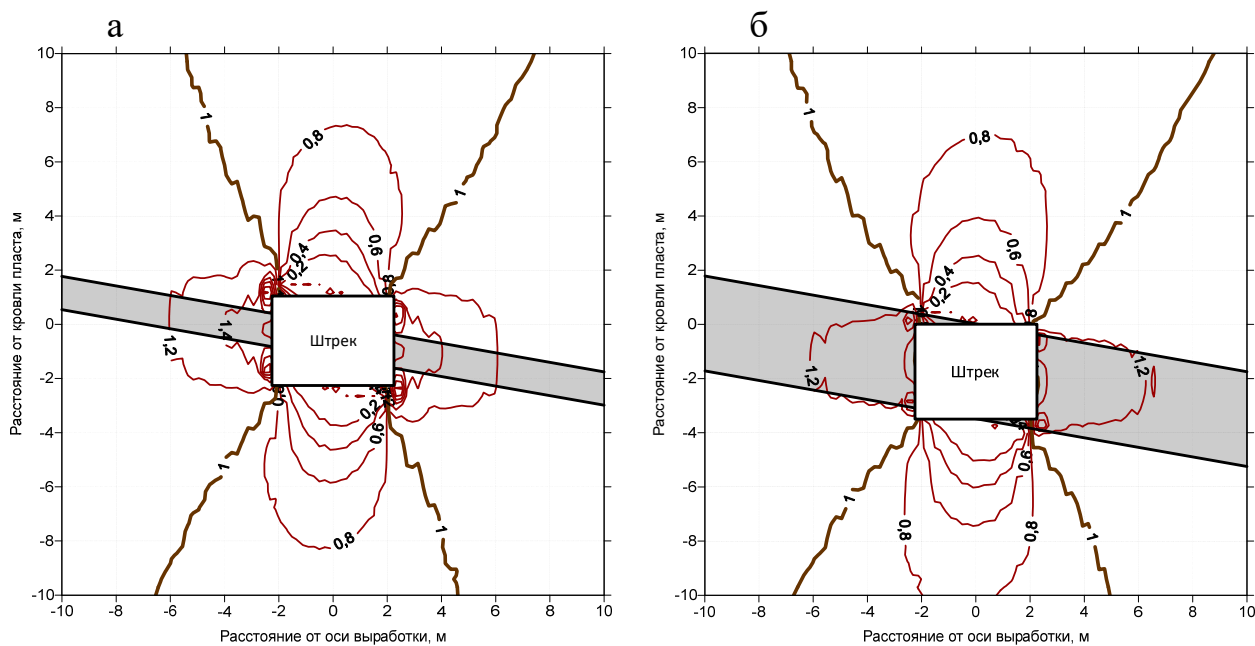


Рис. 11. Изолинии распределения коэффициентов концентрации вертикальных напряжений в окрестности одиночной выработки при проведении по пласту мощностью: а – 1,2 м (вариант 17); б – 3,5 м (вариант 21)

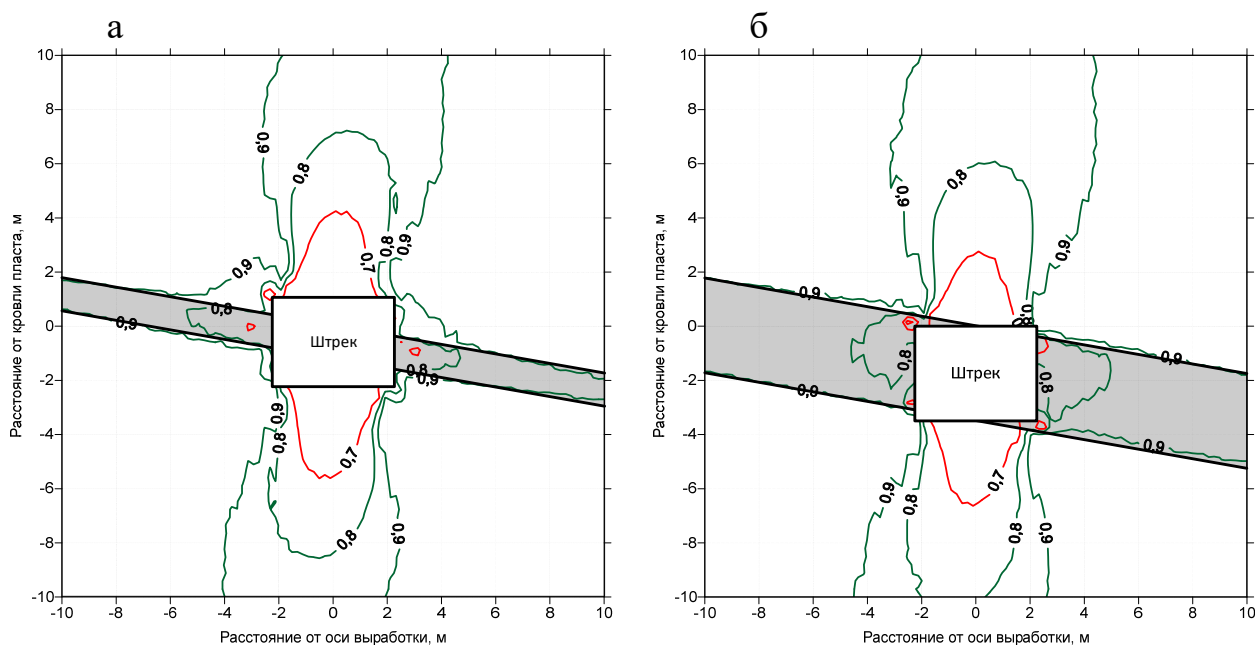


Рис. 12. Изолинии распределения коэффициента остаточной прочности пород в окрестности одиночной выработки при проведении по пласту мощностью: а – 1,2 м (вариант 17); б – 3,5 м (вариант 21)

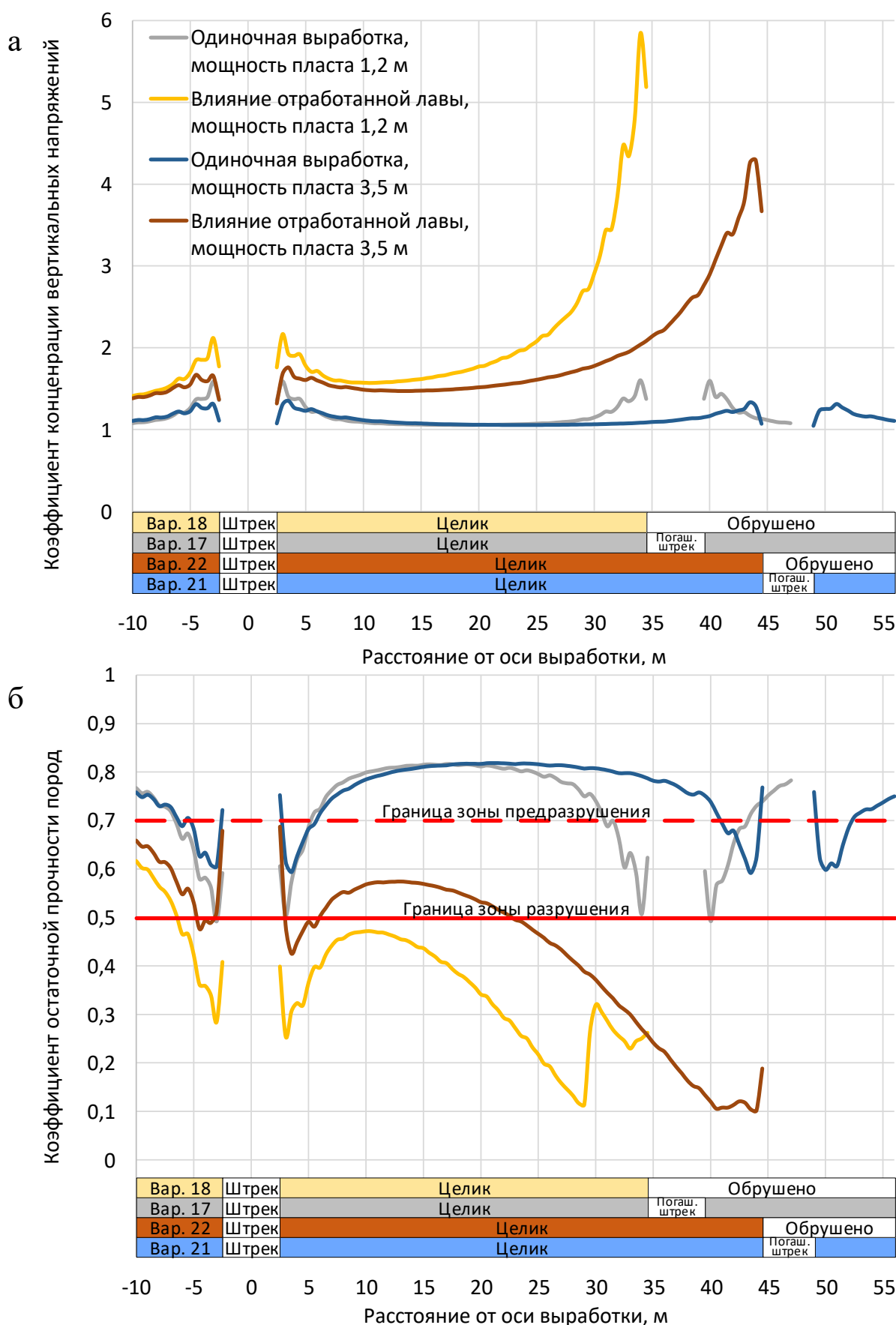


Рис. 13. Графики измерения параметров НДС в зоне влияния подготовительных выработок, очистного выработанного пространства и угольного целика при мощности угольного пласта 1,2 м, 3,5 м для шахт умеренного климата, варианты 3, 4, 15, 16: а – коэффициент концентрации вертикальных напряжений; б – коэффициент остаточной прочности пород

При меньшей мощности пласта коэффициенты концентрации вертикальных напряжений вблизи выработок в 1,3-1,5 раза больше, что повлияло на коэффициент остаточной прочности угольного пласта в боках охраняемого целиком штрека, который в 1,3 раза меньше в тонком пласте по сравнению с мощным пластом.

Высота зоны предразрушения в кровле подготовительной выработки при положительных и отрицательных температурах горных пород обратна пропорциональна мощности угольного пласта.

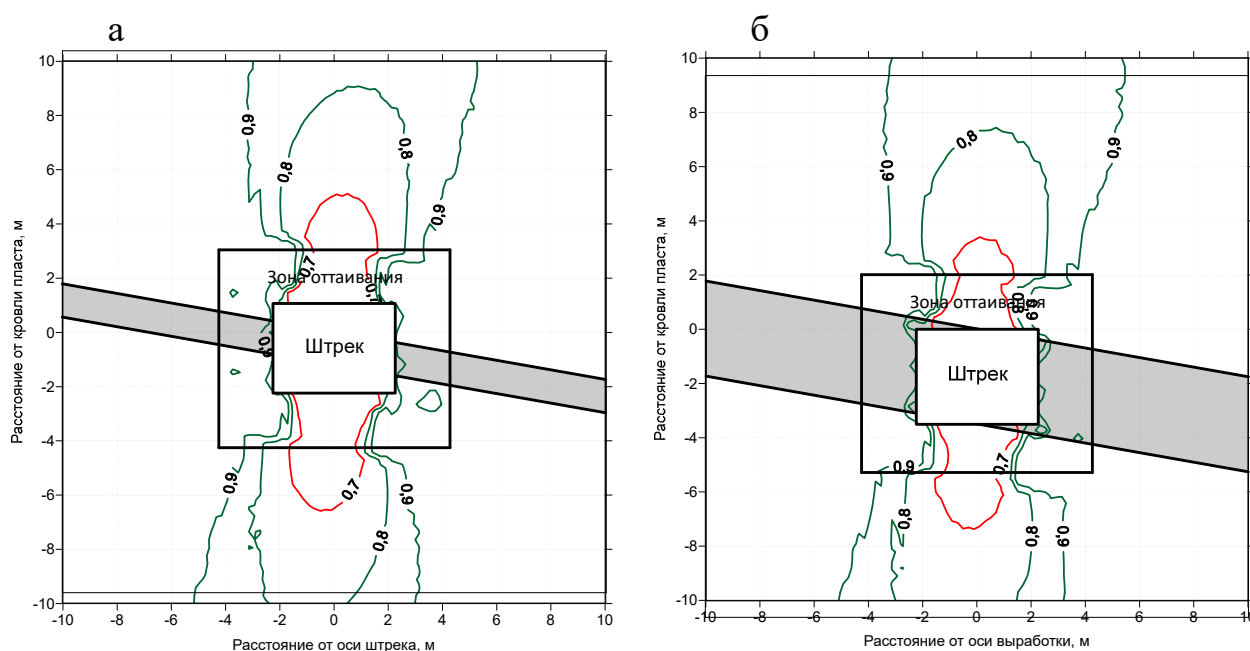
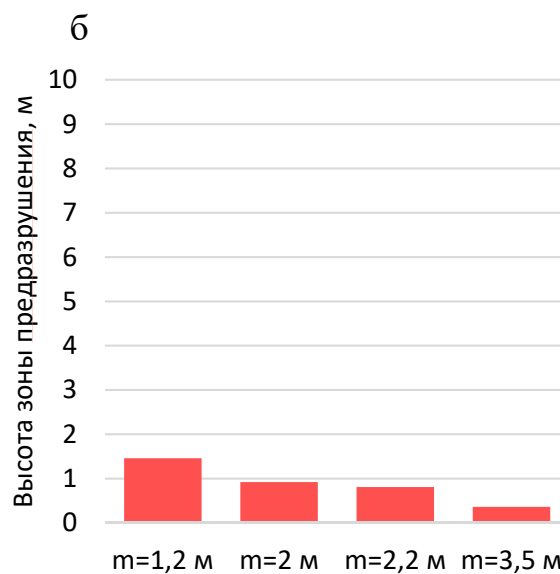
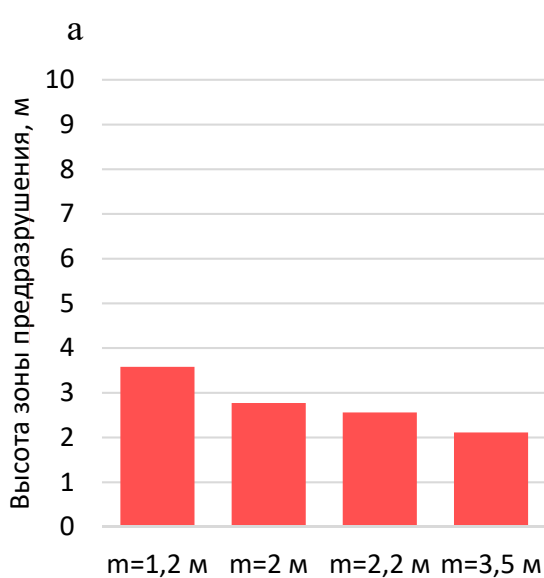


Рис. 14. Изолинии распределения коэффициента остаточной прочности пород в окрестности выработок в криолитозоне: а – одиночная выработка, мощность пласта 1,2 м (вариант 51); б – одиночная выработка, мощность пласта 3,5 (вариант 55)



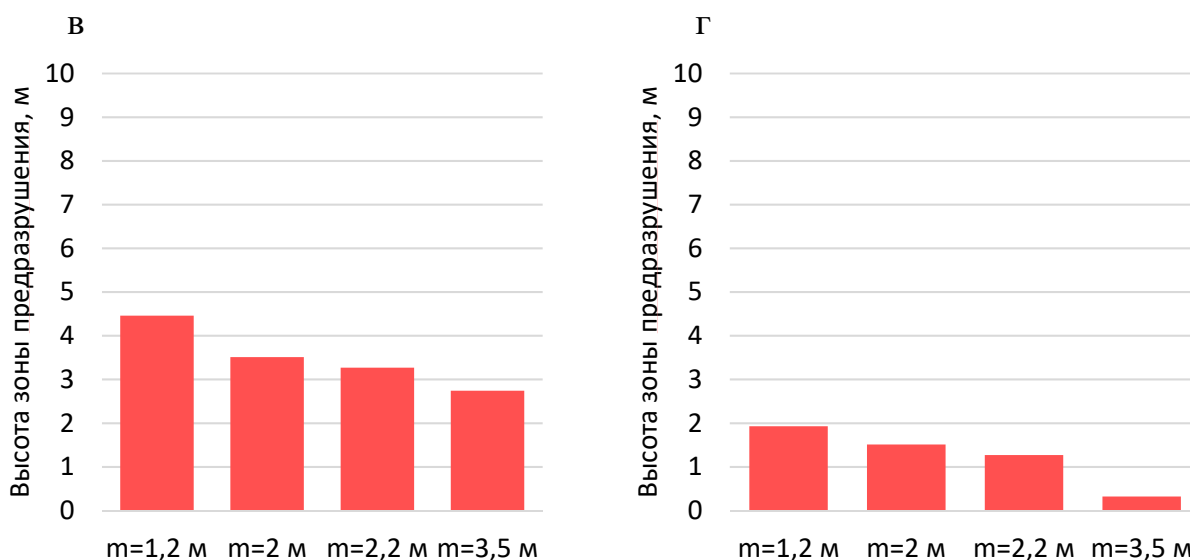


Рис. 15. Гистограммы высот зон предразрушения в кровле подготовительной выработки при различных мощностях пластов: а – зона умеренного климата, одиночная выработка (варианты 17, 9, 19, 21); б – зона умеренного климата, охраняемая целиком выработка (варианты 18, 20, 20, 22); в – криолитозона, одиночная выработка (варианты 51, 43, 53, 55), г – криолитозона, охраняемая целиком выработка (варианты 52, 44, 54, 56)

В приложении 1 представлен весь атлас вариативности сценариев формирования напряжённо-деформированного состояния массива в окрестности подготовительных выработок для различных вариантов горно-геологических и горнотехнических условий освоения угольных месторождений подземным способом (160 рисунков).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе выполненных исследований разработан атлас вариативности сценариев формирования напряжённо-деформированного состояния массива в окрестности подготовительных выработок для различных вариантов горно-геологических и горнотехнических условий освоения угольных месторождений подземным способом.

Научные результаты, выводы и рекомендации заключаются в следующем:

1. Разработана программа вычислительного эксперимента, включающая формирование моделей массива горных пород с изменением в каждой модели одного из горно-геологических или горнотехнических параметров. Всего было исследовано 84 модели, основанных на реальных условиях 12 шахт Кузбасса, 1 шахте Хабаровского края, 1 шахте Якутии.

2. Исследования проведены посредством численного эксперимента с использованием методики количественного прогнозирования напряжённо-деформированного состояния неоднородного массива горных пород с обязательной калибровкой каждого варианта по результатам шахтных и

лабораторных экспериментов, обеспечивающей прогноз геомеханических параметров в следующих горно-геологических и горнотехнических условиях.

3. Проведены натурные исследования устойчивости подготовительных выработок при подземной разработке угольных пластов с использованием следующих методов: визуальное обследование состояния выработок при маршрутной съёмке по пикетам, эндоскопическое обследование породных слоёв в скважинах с помощью видеоэндоскопа, георадиолокационные измерения временных интервалов между отражёнными от контактов породных слоёв импульсами, отбор кернов из кровель выработок и последующее определение физико-механических свойств отобранных пород, наблюдение за смещением реперов.

4. Получено соответствие смоделированных результатов натурным измерениям зон распределения коэффициента остаточной прочности пород.

5. Реализована программа исследований влияния природных и техногенных факторов на геомеханические параметры массива горных пород в окрестности системы подземных горных выработок, включающая 84 варианта с расположением одиночной выработки и группы выработок в условиях шахт умеренного климата и криолитозоны. Программа прогнозирования геомеханических параметров реализована поэтапно: в окрестности одиночной и охраняемой угольным целиком подготовительной выработки. Для каждого этапа отдельно учтены условия шахт умеренного климата и криолитозоны.

6. Создан атлас вариативности сценариев формирования напряжённо-деформированного состояния массива в окрестности подготовительных выработок для различных вариантов горно-геологических и горнотехнических условий освоения угольных месторождений подземным способом. Атлас предназначен для организаций и работников, занимающихся расчётом параметров крепи горных выработок при разработке документации крепления и поддержания горной выработки.

7. Для одиночной выработки, расположенной в зоне умеренного климата, выявлены следующие закономерности и зависимости влияния отдельных и группы природных и техногенных факторов на геомеханические параметры массива горных пород:

- при изменении глубины разработки прямо пропорционально увеличивается высота свода разгрузки в кровле выработки, на глубине $H > 300$ м установка крепи в боках одиночной выработки является обязательной;

- при изменении мощности пласта в пределах 1,2-3,5 м максимальные величины коэффициента концентрации вертикальных напряжений выявлены на сопряжении кровли и боков выработки при меньшей мощности пласта, а высота зоны предразрушения пород кровли в выработке, пройденной по тонкому пласту, почти в 2 раза больше по сравнению с соответствующей высотой над выработкой на мощном пласте;

- в массиве горных пород, включающем одиночную выработку и дизъюнктивное нарушение, коэффициент концентрации вертикальных напряжений увеличивается в 1,3 раза, а ширина зоны предразрушения угольного пласта между выработкой и нарушением достигает величины, равной мощности пласта;

- наличие слабого породного прослойка в кровле выработки приводит к формированию общей зоны предразрушения пород непосредственно в своде и в пределах прослойка.

8. Выявлены следующие особенности распределения геомеханических параметров в окрестности выработок, расположенных в криолитозоне, по сравнению с закономерностями в окрестности выработок в зонах умеренного климата:

- коэффициент остаточной прочности пород в боках выработок в криолитозоне обратно пропорционально зависит от разности температур шахтной атмосферы и времени эксплуатации выработки;

- появление вблизи периметра выработки частично оттаявших пород приводит к расширению границ зоны разгрузки в кровле и почве выработки, а в краевой части пласта максимумы эпюры опорного горного давления перемещаются вглубь угольного массива;

- подтверждено соответствие закономерности уменьшения коэффициента концентрации вертикальных напряжений в угольном целике при увеличении глубины разработки в любой климатической зоне;

- негативное влияние дизъюнктива на геомеханические параметры в криолитозоне по сравнению с условиями умеренного климата распространяется более интенсивно как по величинам, так и по области влияния;

9. Для одиночных и охраняемых целиком выработок в зоне умеренного климата и криолитозоне справедливы следующие утверждения:

- коэффициент остаточной прочности пород определяет их устойчивость. При $K_{оп} \leq 0,5$ происходит разрушение пород, при $0,5 < K_{оп} \leq 0,7$ формируется зона предразрушения (трещины, блоки, возможны вывалы), при $0,7 < K_{оп} \leq 1$ уголь или порода находятся в упругом состоянии без нарушения сплошности.

- высота зоны предразрушения в кровле выработки при положительных и отрицательных температурах увеличивается прямо пропорционально глубине разработки и обратно пропорционально увеличению мощности угольного пласта;

- коэффициент концентрации вертикальных напряжений в зоне умеренного климата в 1,2-1,4 раза меньше по сравнению с аналогичными участками вблизи выработки в криолитозоне;

10. Результаты исследований в виде способов, средств и рекомендаций использованы в условиях 12 шахт Кузбасса, АО «Ургалуголь», ОАО ХК «Якутуголь» Шахта «Джебарики-Хая», что подтверждено соответствующими справками и протоколами.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО

в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки

1. Разумов Е. А., Калинин С. И., Петрова О. А. Методика оценки комплексного влияния анкеров разных типов на напряжённо-деформированное состояние пород кровли подготовительных выработок // Горный журнал, 2023. – № 1 (2306). – С. 130-132.

2. Исследование напряжённо-деформированного состояния горных пород очистного забоя при наработке и подработке угольного пласта // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2022. – № 2 (150). – С. 51-63.

3. Калинин С. И., Роут Г. Н., Игнатов Ю. М., Разумов Е. А. Исследование изменений в параметрах геомеханических процессов при высоких скоростях подвигания лав // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2021. – № 1 (143). – С. 46-55.

4. Разумов Е. А., Калинин С. И., Лупий М. Г., Пудов Е. Ю. Оценка влияния длины лавы и скорости подвигания лавы на основные геомеханические процессы в очистных механизированных забоях // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2021. – № 2 (144). – С. 83-92.

5. Разумов Е. А. Оценка факторов сложности условий ведения горных работ на современных угольных шахтах // Уголь, 2019. - № 10 (1123). – С. 16-21.

6. Зеляева Е. А., Разумов Е. А., Венгер В. Г., Григорьева Т. О. Прогнозирование параметров зон предразрушения горных пород в окрестности подземных выработок угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2018. – № S49. – С. 283-289.

7. Разумов Е. А., Клишин В. И., Опрук Г. Ю., Гречишкин П. В. Совершенствование технологии анкерного крепления горных выработок угольных шахт в условиях многолетней мерзлоты // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2016. – № 5. – С. 133-140.

8. Разумов Е. А., Сидельников А. А., Гречишкин П. В., Позолотин А. С., Венгер В. Г. Повышение устойчивости подземных горных выработок угольных шахт, проводимых в многолетнемёрзлых породах с применением сталеминеральной анкерной крепи // Уголь, 2014. – № 11 (1064). – С. 12-15.

в прочих изданиях

9. Венгер В. Г., Разумов Е. А., Пудов Ю. Е., Калинин С. И. Исследование процесса формирования высоких куполов в подготовительных выработках и обоснование метода расчёта параметров куполов и анкерной крепи для крепления куполов // Научно-технические проблемы разработки и использования минеральных ресурсов, 2021. – № 7. – С. 356-360.

10. Разумов Е. А., Венгер В. Г., Пудов Е. Ю., Калинин С. И. Классификация осложняющих горно-геологических и техногенных факторов и методика оценки их влияния на устойчивость горных выработок // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук, 2021. – Т. 8. – № 1. – С. 267-273.

11. Разумов Е. А., Венгер В. Г., Петров В. И. Динамическое моделирование подземных горных выработок и прилегающего массива // Научно-технические проблемы разработки и использования минеральных ресурсов, 2018. – № 4. – С. 391-393.

12. Разумов Е. А., Пудов Е. Ю., Кузин Е. Г. Повышение информативности данных о структуре пород кровли за счёт применения георадиолокации при обследовании состояния выработок // Научно-технические проблемы разработки и использования минеральных ресурсов, 2018. – № 4. – С. 393-398.