

На правах рукописи

БОРГЕР ЕЛЕНА БОРИСОВНА



**ГЕОЛОГО-МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОВАЛОВ НА ЗЕМНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ШАХТ ЦЕНТРАЛЬНОГО КУЗБАССА**

*Специальность 25.00.16 – Горнопромышленная
и нефтегазопромысловая геология, геофизика,
маркшейдерское дело и геометрия недр*

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Кутепов Юрий Иванович

Официальные оппоненты:

Макаров Александр Борисович

доктор технических наук, профессор, SRK Consulting (Russia) Ltd филиал частной компании с ограниченной ответственностью «Эсаркей Консалтинг (Россия) Лимитед» (Великобритания), главный консультант по геомеханике;

Ческидов Василий Владимирович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», заместитель директора Горного института.

Ведущая организация – ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, защите инженерных сооружений от обводнения, специальным горным работам, геомеханике, геофизике, гидротехнике, геологии и маркшейдерскому делу», г. Белгород.

Защита диссертации состоится 10 декабря 2020 г. в 10 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Горного университета ГУ 212.224.08 по адресу 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 9 октября 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КУЗИН
Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одной из важнейших проблем инженерной геодинамики, изучающей природные и техногенные инженерно-геологические процессы, является оценка и прогноз развития провалов – нарушений сплошности земной поверхности вследствие обрушения толщи пород над сформировавшимися полостями. Образование данных полостей обычно связано с действием подземных вод, приводящих к растворению и фильтрационному выносу пород. Особую роль в создании крупных пустот в породных массивах принадлежит человеку, осуществляющую хозяйственную деятельность при освоении подземного пространства, в том числе, при выполнении горных работ. Разработка угольных месторождений подземным способом также сопровождается образованием большого количества пустот, над которыми при определенных условиях формируются провалы, нарушающие поверхность земли и создающие угрозу для жизнедеятельности.

Опыт добычи угля прошлого столетия в России и за рубежом свидетельствует о возможном развитии процессов провалообразования при разработке пологих и наклонных пластов (менее 35°) при глубине отработки меньше $20 \cdot m$ (где m – мощность пласта). Данный критерий для угольной отрасли России принят нормативным документом – «Правилами охраны...» 1998 года, действующим в настоящее время. Однако наметившиеся в последние несколько десятилетий существенные изменения в механизации и технологии очистных горных работ, связанные с применением высокопроизводительных добычных комплексов, привели к образованию на земной поверхности шахт провалов при кратности отработки, значительно превышающей обоснованный ранее критерий. Так, в Центральном Кузбассе провалы были отмечены в 2004 году на участке «Красноярский» одноименной шахты при извлечении угля из пласта «Байкаимский» при кратности отработки $(80 \div 90) \cdot m$. В дальнейшем, при отработке свиты из трех пластов на данном участке отмечена интенсификация нарушений сплошности земли, которая стала носить угрожающий характер. Установлено образование провалов протяженностью до 1,5 км, глубиной и шириной раскрытия до 7 м. Данные обстоятельства предопределили необходимость выполнения специальных исследований с целью изучения процессов образования провалов и

разработки методики их прогноза применительно к шахтам Центрального Кузбасса, что и определяет **актуальность** диссертационной работы.

Степень разработанности проблемы. Оценке и прогнозу образования провалов естественного происхождения посвящены работы Д.С. Соколова, Г.А. Максимовича, Н.А. Гвоздецкого, Г.П. Постоева, А.В. Аникеева и др. Изучением геомеханических процессов, в том числе провалов, образующихся при разработке угольных и рудных месторождений занимались Г. Кратч, С.Г. Авершин, Д.А. Казаковский, В.Н. Земисев, А.Г. Акимов, И.А. Петухов, М.А. Иофис, А.С. Батугин, А.А. Борях, В.Н. Гусев, А.Б. Макаров, М.Г. Мустафин, О.И. Казанин, Ю.И. Кутепов, Ю.Ю. Кутепов, С.Н. Зеленцов и др. На шахте им. А.Д. Рубана изучение провалообразования начато А.А. Мешковым. Данные диссертационные исследования являются логическим продолжением этих работ. Среди зарубежных авторов, занимавшихся изучением провалов, можно выделить А.С. Waltham, J.G. Newton, W. Zhou, B.F. Beck и др. Следует также отметить, что выполненные исследования практически не рассматривали вопросы образования провалов на шахтах в результате развития процессов сдвижения горных пород.

Предметом исследования являются горно-геологические процессы сдвижения и провалообразования, возникающие при подземной разработке угля в Центральном Кузбассе.

Объектами исследования являются земная поверхность и подрабатываемые массивы как среда для развития горно-геологических процессов сдвижения и провалообразования при подземной разработке угля.

Целью работы является разработка геолого-маркшейдерского обеспечения прогнозирования провалов на земной поверхности шахт Центрального Кузбасса на основании изучения сдвижения горных пород.

Поставленная цель достигается решением следующих **научно-технических задач**:

1. Произвести анализ горно-геологических условий шахты им. А.Д. Рубана; установить геологические и инженерно-геологические особенности подработанной толщи на участках шахтного поля.

2. Выполнить изучение процессов образования провалов на подрабатываемой земной поверхности в границах участков «Краснояр-

ский» и «Магистральный». Обосновать типизацию и механизм образования провалов.

3. Выполнить специальный опытно-промышленный эксперимент по изучению влияния сдвижения горных пород на развитие провалов при отработке пионерной лавы № 812 на участке «Магистральный».

4. Разработать систему геолого-маркшейдерского обеспечения и методику прогнозирования провалов на базе комплекса методов, включающего эмпирический, полуэмпирический подходы и численное моделирование.

Идея диссертационной работы заключается в использовании для прогноза провалов на шахтах комплекса методов математической статистики и численного моделирования, а также зависимостей параметров процесса провалообразования от горно-геологических и технологических условий отработки угольных пластов.

Научная новизна заключается в следующем:

- выявлены характерные типы, причины и основные факторы, определяющие образование провалов на земной поверхности шахты имени А.Д. Рубана;

- установлены закономерности формирования провалов на земной поверхности участков шахт при развитии процесса сдвижения горных пород в зависимости от горно-геологических условий их отработки.

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 25.00.16 – Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (пп. 3, 5, 7, 17).

Положения, выносимые на защиту:

1. Образование провалов на земной поверхности шахт Центрального Кузбасса приурочено к геологическим условиям, характеризующимся преобладанием в массиве мощных слоев песчаника и наличием их в основной кровле отрабатываемых пластов, а также большой мощностью покровной толщи со структурно-неустойчивыми лессовидными образованиями в верхней ее части.

2. Большинство образовавшихся на земной поверхности шахты имени А.Д. Рубана провалов являются результатом развития процесса сдвижения горных пород, при этом их тип, морфология и ме-

ханизм образования зависят от степени и кратности подработки, наличия целиков и раскройки шахтного поля.

3. Прогноз провалов на шахтах предлагается осуществлять на базе разработанной системы геолого-маркшейдерского обеспечения с использованием установленных закономерностей провалообразования, результатов специальных исследований и численного моделирования процессов сдвижения.

Методология и методы исследований. В работе использован комплексный подход к решению задач, включающий системный анализ результатов геологической разведки по месторождению, проектной документации, научной и нормативно-методической литературы, натурные исследования процессов сдвижения и провалообразования, опытно-промышленные эксперименты, статистическую обработку полученных результатов, методы численного моделирования.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана методика опытно-промышленного эксперимента для определения параметров провалов.

2. Выполнен прогноз параметров и мест образования провалов на земной поверхности участка «Магистральный» шахты имени А.Д. Рубана при отработке пластов «Полысаевский II», «Надбайкаимский» и «Байкаимский».

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обусловлена сходимостью результатов расчетов сдвижения с натурными измерениями деформаций поверхности и массива, а также применением современных методов математической статистики для обработки экспериментальных данных и компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния подрабатываемого массива.

Личный вклад автора заключается в формулировании цели и задач исследования; изучении процессов сдвижения и провалообразования на участках «Красноярский» и «Магистральный» шахты имени А.Д. Рубана; анализе результатов исследований и установлении закономерностей образования провалов на подрабатываемых территориях, разработке методики прогноза провалов для шахт Центрального Кузбасса.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Результаты диссертационного исследования использовались при разработке проектов ликвидации участка «Красноярский» имени А.Д. Рубана

АО «СУЭК-Кузбасс» при обосновании объемов рекультивационных работ.

Апробация работы. Результаты диссертации апробированы в виде 8 докладов на международных научных конференциях и других научных мероприятиях: на Международных научных симпозиумах «Неделя Горняка» (НИТУ «МИСиС», Москва, 23-27 января 2017 г., 28 января – 01 февраля 2019 г.); на VIII Международной научно-практической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ» (Горный университет, г. Санкт-Петербург, 15-17 мая 2017 г.); на Международной научно-практической конференции «Подземная угледобыча XXI век» (АО «СУЭК-Кузбасс», г. Ленинск-Кузнецкий, 10-14 сентября 2018 г.); на Третьем международном инновационном горном симпозиуме (КузГТУ, г. Кемерово, 03-05 октября 2018 г.); на X Международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу» (МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, 27-31 мая 2019 г.).

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 4 статьях в изданиях из перечня рекомендуемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в том числе в 1 статье в издании, входящем в международную базу цитирования Scopus, а также в 1 статье в прочих изданиях.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 121 наименование, изложена на 187 страницах машинописного текста и содержит 72 рисунка и 17 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю работы профессору Ю.И. Кутепову, генеральному директору АО «СУЭК-Кузбасс» - кандидату технических наук А.А. Мешкову, докторам технических наук А.Н. Шабарову, М.Г. Мустафину, В.Н. Гусеву, Н.А. Кутеповой, кандидатам технических наук С.Н. Зеленцову, Ю.Ю. Кутепову, М.Г. Выстрчилу за помощь в выполнении исследований и обсуждении их результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность диссертационной работы, ее цель, идея, задачи и научная новизна, а также защищаемые положения, практическая значимость проводимого исследования и личный вклад автора.

В **первой главе** приведен анализ изученности вопросов образования провалов на земной поверхности в естественных природных условиях и при хозяйственной деятельности, в частности, при подземной разработке угольных месторождений; поставлены цель и сформулированы задачи работы.

Вторая глава посвящена анализу горно-геологических условий шахты, а именно: геологического строения, инженерно-геологических и гидрогеологических условий участков, параметров и технологии отработки угля на участках.

Третья глава включает описание провалов на земной поверхности участка «Красноярский», их типизацию и основные причины образования; содержит результаты анализа опытно-промышленного эксперимента, позволившего получить зависимости ширины раскрытия трещин и глубины их проникновения от параметров сдвижения.

Четвертая глава рассматривает предложенную систему геолого-маркшейдерского обеспечения прогнозирования провалов на земной поверхности; содержит методики их прогнозирования эмпирическим и полуэмпирическими методами, а также с применением численного моделирования.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

Основные результаты исследований отражены в следующих **защищаемых положениях**:

1. Образование провалов на земной поверхности шахт Центрального Кузбасса приурочено к геологическим условиям, характеризующимся преобладанием в массиве мощных слоев песчаника и наличием их в основной кровле отрабатываемых пластов, а также большой мощностью покровной толщи со структурно-неустойчивыми лессовидными образованиями в верхней ее части.

Шахта имени А.Д. Рубана АО «СУЭК-Кузбасс» расположена на территориях Беловского и Ленинск-Кузнецкого районов Централь-

ного Кузбасса, отрабатывает лицензионные участки «Красноярский», «Магистральный» и «Благодатный Глубокий» Егозово-Красноярского месторождения. Особенностью геологического строения участков шахты является повышенная угленасыщенность (до 8,5%), слоистое строение с крупным и средним режимами ритмичности осадконакопления и превалирующим содержанием в разрезе песчаников (Таблица 1), а также наличие мощных слоев песчаника в непосредственной кровле отрабатываемых мощных пластов угля «Байкаимский» и «Полысаевский II». На шахте ведется отработка угольных пластов «Полысаевский II», «Надбайкаимский» и «Байкаимский» мощностью 4,7 м, 2,15 м и 2,75 м соответственно (Рисунок 1).

Таблица 1 – Содержание пород в подрабатываемой толще

Название участка месторождения	Процентное содержание, %			
	Песчаник	Алевролит	Аргиллит	Уголь
«Красноярский»	42	30	16	12
«Магистральный»	44	36	10	10

Углевмещающие отложения в Центральном Кузбассе повсеместно перекрыты неоген-четвертичными образованиями большой мощности (40-70 м). На изучаемых участках покровная толща характеризуется мощностью 45-50 м, разделяется по возрасту на 8 свит, сложена глинистыми отложениями делювиального, аллювиального и эолового генезиса. Верхняя часть геологического разреза участков представлена лессовидными породами.

Инженерно-геологические условия участков определяются развитием двух групп пород – скальных и дисперсных, отличающихся между собой по физико-механическим свойствам и деформационному поведению, при этом породы первой группы целесообразно разделять на выветрелые и невыветрелые разности. Особый интерес при решении вопроса прогнозирования провалов представляют лёссовидные отложения, т.к. являются средой для их формирования. По гранулометрическому составу лёссовидные отложения относятся к пылеватым суглинкам и характеризуются наличием рыхлого макропористого скелета, незначительной прочностью, высокой сжимаемостью, «псевдохрупким» характером разрушения, высокой просадочностью при до-

оценить морфологию и механизм формирования провалов в конкретных горно-геологических и технологических условиях отработки угольных пластов и установить основные определяющие факторы.

Выполнен анализ провалообразования на поверхности участка «Красноярский» в зависимости от этапов его освоения. На начальном этапе отработки очистные работы по пласту «Байкаимский» велись на двух панелях: одна - в смешанном, другая в нисходящем порядке с параметрами очистных забоев: длина лавы - 125-150 м, протяженность выемочного столба - 1500 м. Различие в отработке панелей заключалось также в использовании межстолбовых целиков в одном случае и их отсутствии - в другом. Отсутствие целиков при отработке первой панели предопределило развитие деформаций земной поверхности без значительных разрывов сплошности, тогда как оставление межстолбовых целиков во втором наблюдаемом случае приводило к развитию провалов и трещин. Возникшие процессы провалообразования подвергнуты всестороннему изучению. В частности, измерялись протяженность, ширина раскрытия и глубина проникновения каждого нарушения сплошности, а также выполнялась привязка места его расположения на плане (Рисунок 2).



Рисунок 2 – Карта-схема мест образования провалов с указанием границ очистных выработок на участке «Красноярский»

Первичные измерения морфологии нарушений позволили выявить появление на начальном этапе подработки земной поверхности незначительных по площади и глубине воронок или трещин небольшой протяженности. При уменьшении глубины расположения выемочных участков отмечалась интенсификация образования воронок и трещин, при этом их протяженность, ширина раскрытия и глубина проникновения увеличивались, достигая, соответственно, значений 50 м, 7 м и 4 м (Рисунок 3а). При этом можно отметить тенденцию образования цепочек воронок в плане на прямой линии. В заключении рассмотрения процесса провалообразования при отработке пласта «Байкаимский» необходимо отметить, что в описанных условиях ведения горных работ кратность подработки составляла $(80 \div 90) \text{ м}$.

Дальнейшая отработка участка «Красноярский» осуществлялась последовательной отработкой пластов «Полысаевский II» и «Надбайкаимский», расположенных в разрезе выше пласта «Байкаимский» (Рисунок 1). Очистные работы производились в смешанном порядке длинными столбами по простиранию с оставлением межстолбовых целиков шириной 25 м при следующих параметрах лав: длина 225 м, протяженность выемочного столба – до 2200 м. Особенностью раскройки шахтного поля участка по всем трем пластам является совпадение расположения целиков в пространстве, за исключением первых трех отработанных выемочных столбов по пласту «Байкаимский», без оставления целиков.

Пласт «Полысаевский II» при вынимаемой мощности $4,2 \div 4,9 \text{ м}$ и глубинах $100 \div 200 \text{ м}$ имел кратность $(21 \div 44) \cdot \text{м}$, что превышает нормативный критерий провалообразования. Оработка пласта на этом участке сопровождалась более интенсивным и масштабным образованием провалов на земной поверхности. Отмечается появление нового характерного типа провала - «борозда», имеющего значительную ширину раскрытия от 3 до 7 м, большую протяженность (до 500 м) и небольшую видимую глубину. При повторной подработке земной поверхности происходило образование «канав» значительной протяженности (до 1000 м) с отвесными краями, большой ширины раскрытия (до 10 м) и глубины (до 5 м) (Рисунок 3б). Следует отметить, что образование «канав» происходило, как правило, после повторной подработки, что свидетельствует об определяющем

влиянии сдвижения горных пород на процессы деформирования и нарушения сплошности земной поверхности.

Анализ площадного развития процессов провалообразования на земной поверхности в пределах шахтного поля показал практическое отсутствие таких процессов в западной части участка, однократно подработанной, и более интенсивное развитие процессов - в юго-восточной и южной частях участка, где проводилась повторная подработка. Изученные провалы являются, по всей видимости, различными стадиями процесса их формирования, развивающегося в приповерхностной части подрабатываемого массива горных пород в результате образования мульды сдвижения. Доказательством тому служат места возникновения и расположения провалов, которые четко привязаны к межстолбовым целикам, монтажным и демонтакжным камерам, т.е. границам выработанных пространств по простиранию и вкрест простирания пород. Установлено, что каждый из типов провалов происходит на различных этапах подработки поверхности. При первичной подработке пластом небольшой мощности образуются трещины, которые постепенно под действием атмосферных вод превращаются в воронки в результате просадок лёссовидных суглинков. Последующие отработки угольных пластов при сохранении в плане положений лав по пластам провоцируют дальнейшее формирование провалов в виде борозд и канав пропорционально развитию горизонтальных деформаций растяжения.



Рисунок 3 – а) цепочка воронок; б) канава

Изучение влияния параметров сдвижения горных пород на процесс образования провала производилось опытно-промышленным экспериментом на участке «Магистральный» при отработке выемочного столба лавой № 812 по пласту «Полысаевский II». В процессе отработки лавы на подрабатываемой земной поверхности и в массиве горных пород производились измерения деформаций поверхностными и глубинными реперами. Лава длиной 300 м при вынимаемой мощности пласта 4,74 м введена в эксплуатацию с января 2018 года и отработывала в течение года выемочный столб длиной 2335 м, очистные работы велись с полным обрушением кровли. Анализ натурных наблюдений за деформациями реперов позволил получить значения фактической максимальной кривизны и горизонтальной деформации растяжения соответственно $K_0 = 0.62 \cdot 10^{-3}$ 1/м и $\varepsilon_0 = 18.2 \cdot 10^{-3}$. Статистический анализ позволил получить зависимости ширины раскрытия трещин и глубины проникновения от параметров сдвижения.

3. Прогноз провалов на шахтах предлагается осуществлять на базе разработанной системы геолого-маркшейдерского обеспечения с использованием установленных закономерностей провалообразования, результатов специальных исследований и численного моделирования процессов сдвижения.

Обоснована система обеспечения прогнозирования провалов - СОПП, включающая выполнение работ и исследований по изучению горно-геологических условий шахт и прогнозированию развития на поверхности земли провалов.

В рамках первого направления производится паспортизация всех нарушений сплошности земной поверхности на участке, анализ условий их появления, установление причин и механизма развития. Кроме того, выполняются специальные исследования структурной прочности лёссовидных пород и организуются опытно-промышленные эксперименты по изучению деформационного поведения подрабатываемого массива с целью выявления мест потенциального образования провалов и установления параметров провалов.

Второе направление разработанной СОПП предполагает выполнение прогноза, а именно: мест потенциального развития провалов и трещин на земной поверхности с использованием метода статистической обработки фактической съемки нарушений сплошности и пас-

портизации данных геомеханических явлений; параметров провалов и трещин по аналитическим зависимостям, полученным при обработке выполненных опытно-промышленных экспериментов; потенциальных зон провалообразования численным моделированием МКЭ.

Прогнозирование возникновения зон образования провалов на новых участках месторождения предлагается осуществлять с использованием статистического анализа нарушений сплошности земной поверхности, образовавшихся при отработке пластов «Полысаевский II» и «Байкаимский» на участке «Красноярский». В процессе обработки опытных данных получены значения математического ожидания удаления зон нарушений от границ целиков $\bar{X} = 28,59$ м при среднеквадратическом отклонении $\sigma = 19,25$ м. В ходе работы была проверена и принята гипотеза о соответствии распределения появления разрывных нарушений нормальному закону распределения. Для компенсации случайных ошибок, присутствующих в рассчитанных значениях математического ожидания и стандарта распределения, при определении вероятной границы зоны нарушений использовалось t -распределение Стьюдента (1).

$$R_p = \bar{X} + c_{p,r} \cdot \sigma, \quad (1)$$

где: R_p – удаление границы зоны возникновения нарушений от границ разработки и предохранительных целиков для доверительной вероятности p ; $c_{p,r}$ – коэффициент t -распределения, выбираемый в соответствии с доверительной вероятностью P_0 по количеству степеней свободы r . Имеющийся опыт позволил принять для практического использования доверительную вероятность 0,95. В рассматриваемой задаче значения коэффициента $c_{p,r}$ для доверительной вероятности 0,95 будут равны 2,03. В этом случае $R_{0,95} = 28,59 + 2,03 \cdot 19,25 = 67,67$ м.

Используя полученную величину R_p для нахождения удаления границы зоны возникновения нарушений от границ разработки для пласта «Байкаимский» на участке «Красноярский», выполнен прогноз мест образования провалов для того же пласта на участке «Магистральный». Статистический анализ обработки информации о нарушениях поверхности при отработке пласта «Полысаевский II» позволил рассчитать удаление границы зоны возможного проявления разрывных нарушений для условий участка «Магистральный»

на расстоянии 15 м, что значительно меньше, чем при отработке пласта «Байкаимский».

Разработанная комплексная методика прогнозирования провалов включает в себя также современный метод определения мест возможного образования нарушений сплошности на земной поверхности в условиях подработки массивов горных пород угольными шахтами – численное моделирование сдвижения пород. Это позволяет выполнить многовариантные расчеты напряженно-деформированного состояния пород подрабатываемого массива на различных этапах отработки пластов в пределах исследуемого участка. Задача решалась в плоско-деформационной постановке в рамках механики сплошных сред. Для описания деформационного поведения массива горных пород принята упругопластическая геомеханическая модель с критерием пластичности Кулона-Мора. Параметры модели принимались на основании результатов геологической разведки участка. Для описания механического поведения попадающих в зону изменения напряжений лёссовидных суглинков, характеризующихся наличием структурной прочности, обосновано использование в модели Кулона-Мора дополнительного параметра «Tension Cutoff» (усечение в области растяжения). Это необходимо для того, чтобы ограничить прочность материала в зонах растягивающих напряжений. Значение данного параметра принималось соответствующие структурной прочности, которая для лёссовидных пород составляет 5–15 кПа.

В рамках выполненных диссертационных исследований произведены расчеты зон наиболее вероятного образования провалов для условий отработки участка «Магистральный» (Рисунок 4). При моделировании рассчитывались относительные пластические деформации растяжения в покровной толще неоген-четвертичных пород.

Разработана оригинальная методика определения зависимостей ширины раскрытия и глубины проникновения провалов и трещин в зависимости от параметров сдвижения по результатам обработки результатов опытно-промышленных экспериментов. Подобный эксперимент выполнен для условий отработки выемочного столба лавой № 812 по пласту «Полысаевский II» участка «Магистральный». Анализ результатов натурных измерений параметров трещин, образовавшихся в границах мульды сдвижения над выемочным столбом, методами математической статистики позволил установить, что

наиболее вероятной шириной раскрытия трещин является значение $P_0 = 0,14$ м, а максимальной статистической шириной раскрытия – значение $P_{\max} = 1,47$ м; наиболее вероятной глубиной проникновения трещин является значение $\Gamma_0 = 0,49$ м, а максимальной статистической глубиной проникновения – значение $\Gamma_{\max} = 2,02$ м. Приведенные значения ширины раскрытия и глубины проникновения трещин реализуются при установленных в данных условиях фактических параметрах сдвижения - максимальных значений кривизны выпуклости (K_0) и горизонтальных деформаций растяжения (ϵ_0).

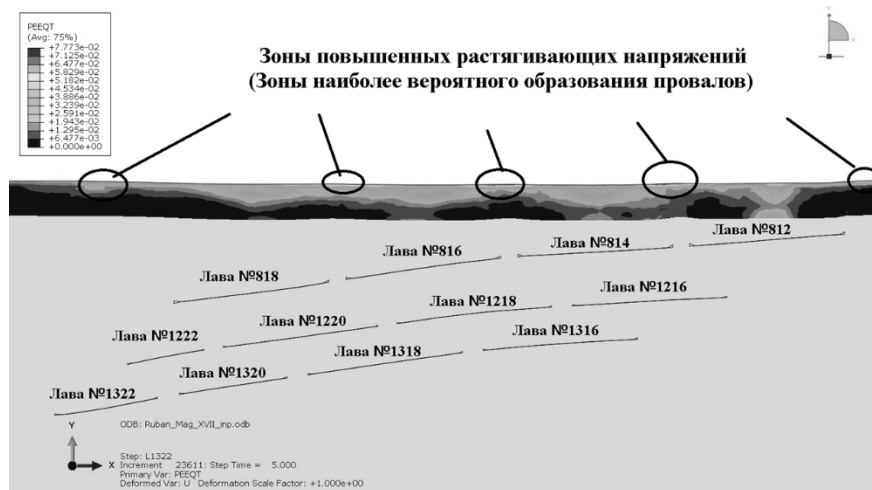


Рисунок 4 – Моделирование зон наиболее вероятного образования провалов

Полученные в результате статистической обработки регрессионные зависимости наиболее вероятной (P) и максимальной ($P_{\max}$) ширины раскрытия трещин от достигнутых значений кривизны (K) и горизонтальных деформаций (ϵ) мульды сдвижения приведены ниже (2) – (5).

$$P = 5,798 \cdot K^{0,506} \quad (2)$$

$$P = 4,567 \cdot \epsilon^{0,846} \quad (3)$$

$$P_{\max} = 59,865 \cdot K^{0,502} \quad (4)$$

$$P_{\max} = 52,394 \cdot \epsilon^{0,866} \quad (5)$$

Для вывода зависимости глубины трещин от ширины раскрытия $\Gamma = f(P)$ были использованы результаты натурных замеров параметров образовавшихся трещин. В результате аналитическое выражение зависимости глубины проникновения трещин (Γ) от ширины их раскрытия (P) приняло следующий вид (6):

$$\Gamma = 1,361 \cdot P^{0,388}. \quad (6)$$

Разработанная комплексная методика, включающая три различных метода, использовалась для прогноза провалообразования на новом участке «Магистральный» при отработке трех пластов угля. Информация о местах и объемах пустот (провалов) на земной поверхности необходима для разработки проектов рекультивации и обеспечения безопасности жизнедеятельности на подрабатываемой территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований представляют собой законченную научно-квалификационную работу, в которой дано решение актуальной задачи – разработано геолого-маркшейдерское обеспечение прогнозирования провалов на земной поверхности шахт Центрального Кузбасса.

Основные научные и практические результаты:

1. Выполнен анализ горно-геологических условий шахты имени А.Д. Рубана, разрабатывающей Егозово-Красноярское каменно-угольное месторождение, на участках с развитием процессов провалообразования. Особенности геологического строения участков определяются наличием: - углевмещающих отложений грамотеинской свиты ерунаковской подсерии кольчугинской серии верхней перми, представленных чередованием слоев алевролита, песчаника и пластов угля при преобладании песчаника; - отрабатываемых пластов «Полысаевский II», «Надбайкаимский» и «Байкаимский» мощностью соответственно 4,7 м, 2,15 м и 2,75 м; - мощных слоев песчаника в непосредственной кровле отрабатываемых пластов; - мощной неоднородной по генезису, состоянию и свойствам покровной толщи неоген-четвертичного возраста, перекрывающей угленосные отложения; - в верхней части разреза «структурно-неустойчивых» лесовидных отложений.

2. Произведен анализ провалов, произошедших на земной поверхности участка "Красноярский" шахты имени А.Д. Рубана при отработке свиты из трех пластов. Предложена типизация нарушений сплошности земли по морфологии и местам проявления на подработанной поверхности. По морфологии выделено четыре типа провальных явлений, отражающих стадии развития единого процесса нарушения сплошности подрабатываемого массива вследствие сдвижения горных пород. Анализ условий отработки участков шахты позволил установить влияющие на провалообразование технологические факторы: степень и кратности подработки; наличие целиков и раскroyка шахтного поля.

3. Анализ натуральных данных опытно-промышленного эксперимента на пионерной лаве по пласту «Полысаевский II» на участке «Магистральный», позволил установить закономерности провалообразования в зависимости от параметров сдвижения в условиях подработки покровной толщи большой мощности (около 50 м). Получены зависимости ширины раскрытия и глубины проникновения трещины от кривизны мульды и горизонтальных деформаций.

4. Обоснована система геолого-маркшейдерского обеспечения прогноза провалообразования, включающая выполнение работ и исследований по изучению их формирования на подрабатываемых поверхностях шахт в зависимости от геологических и технологических условий отработки пластов угля, а также прогнозированию развития на поверхности земли провалов с применением комплекса различных методов.

5. Комплексная методика прогнозирования провалов на новых участках шахт предполагает использование закономерностей, установленных при изучении провалов на предыдущих этапах освоения месторождения, при этом установление мест потенциального нарушения сплошности земли рекомендуется осуществлять либо с использованием метода статистической обработки фактической съемки нарушений относительно границ лав и межлавных целиков, либо численным моделированием; параметры провалов – ширина раскрытия и глубина – следует рассчитывать, используя полученные зависимости.

6. Разработанная методика может использоваться научными, проектными и производственными организациями при изучении и прогнозе провалов на земной поверхности шахт Центрального Кузбасса.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК:

1. Кутепов, Ю.Ю. Численное моделирование процесса сдвижения породных массивов применительно к горно-геологическим условиям шахты имени Рубана в Кузбассе / Ю.Ю. Кутепов, Е.Б. Боргер // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 5. – С. 66-75.

2. Зеленцов, С.Н. Изучение провалов и механизма их образования на подрабатываемой земной поверхности шахты им. А.Д. Рубана / С.Н. Зеленцов, Ю.Ю. Кутепов, Е.Б. Боргер // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 5. – С. 271-280.

3. Кутепов, Ю.И. Изучение сдвижения горных пород на шахте им. А.Д. Рубана в Кузбассе / Ю.И. Кутепов, В.Н. Гусев, Ю.Ю. Кутепов, Е.Б. Боргер // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S48. – С. 132-141.

Публикации в изданиях из перечня ВАК и индексируемых международной научной базой данных и системой цитирования Scopus:

4. Кутепов, Ю.И. Обоснование безопасных условий подземной отработки свиты угольных пластов под гидроотвалом / Ю.И. Кутепов, А.С. Миронов, Ю.Ю. Кутепов, М.В. Саблин, Е.Б. Боргер // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 8. – С. 217-226.

Публикации в прочих изданиях:

5. Гусев, В.Н. Прогноз образования провалов при развитии процесса сдвижения на шахтных полях с большой мощностью покровных отложений (наносов) / В.Н. Гусев, Ю.И. Кутепов, Е.Б. Боргер, Ю.Ю. Кутепов // Маркшейдерский вестник. – 2019. – № 1 (128). – С. 16-23.